



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](#)

2018년 2월
석사학위 논문

패턴 조사 현미경을 이용한 3차원 내시경 연구

조선대학교 대학원

광 기술 공 학 과

박 효 미

패턴 조사 현미경을 이용한 3차원 내시경 연구

3D endoscopy based on structured illumination
microscopy

2018년 2월 23일

조선대학교 대학원

광기술험공학과

박효미

패턴 조사 현미경을 이용한 3차원 내시경 연구

지도교수 주 기 남

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2017년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

박 효 미

박 효 미의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 현 수 (인)

위 원 조선대학교 교수 안 태 정 (인)

위 원 조선대학교 교수 주 기 남 (인)

2017년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서 론	1
제1절 연구 배경	1
제2절 연구 현황	3
1. 2차원 내시경	3
2. 3차원 내시경	4
제3절 연구 목표 및 내용	11
제2장 패턴 조사 현미경을 이용한 3차원 내시경	12
제1절 패턴 조사 현미경	12
1. 패턴 조사 현미경	12
2. 연속 주사형 패턴 조사 현미경	16
제2절 이미징 광섬유 기반 내시경 프로브	25
제3절 연속 주사형 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경	27
제3장 실험 결과 및 분석	30
제1절 기초 실험	31
1. 연속 주사형 패턴 조사 현미경	31

2. 이미징 광섬유 기반 내시경 프로브	38
제2절 패턴 조사 현미경을 이용한 3차원 내시경	41
1. 연속 주사형 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경 구성	41
2. 연속 주사형 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경 실험 및 결과	42
3. 초소형 내시경 프로브 실험 및 결과	46
4. 이중 프로브 실험 및 결과	48
제4장 고찰 및 논의	51
1. 단일 광섬유 번들 사용으로 인한 한계	51
2. 측정 영역 (Field of view, FOV)	53
3. 대물렌즈의 수치 구경에 의한 종축 분해능	53
4. 종축 구동	54
5. 측정 오차	54
제5장 결론	56
[참고문헌]	57

그림 목차

그림 1. 의료용 내시경의 응용	2
그림 2. 산업용 내시경의 응용	2
그림 3. 2차원 내시경	3
그림 4. 3차원 내시경 영상 기술들	4
그림 5. Dual - chip stereo	5
그림 6. Olympus stereo endoscope	6
그림 7. Dual iris stereo endoscope	6
그림 8. Switchable optical paths	7
그림 9. 패턴 조명을 이용한 광 삼각법 3차원 형상 측정 및 내시경 원리	8
그림 10. 비행시간법의 측정 원리	9
그림 11. 패턴 조사 현미경의 광학 구성	13
그림 12. 패턴 조사 현미경의 원리	14
그림 13. 시뮬레이션을 통한 측정 대상 및 패턴 조사 현미경의 위상 천이 이미지	15
그림 14. (a) 임의의 중축 위치에서의 가시도 이미지, (b) 패턴 조사 현미경 의 원리를 적용한 측정 대상의 3차원 복원	16
그림 15. 연속 주사형 패턴 조사 현미경의 광학 구성	17
그림 16. 연속 주사형 패턴 조사 현미경의 원리	18
그림 17. FFT와 IFFT 분석 과정	21
그림 18. 시뮬레이션을 통해 획득된 임의의 한 점에 대한 가시도	22
그림 19. 푸리에 영역 분석 과정	23
그림 20. (a) 임의의 중축 위치에서의 가시도 이미지, (b) 연속 주사형 패턴	

조사 현미경을 적용한 측정 대상의 3차원 복원	24
그림 21. 이미징 광섬유의 원리 및 구조	25
그림 22. 연속 내시경의 구조	26
그림 23. 연속 주사형 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경 광학 구성	27
그림 24. 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경의 공액 관계	28
그림 25. 연속 주사형 패턴 조사 현미경의 (a) 광학 구성, (b) 실제 구성	31
그림 26. LED 광원과 스펙트럼	31
그림 27. 횡방향 구동을 통한 CCD 카메라의 임의의 픽셀의 사인과 패턴 확인	32
그림 28. (a) 평면거울의 (b) 임의의 한 점에 대한 CSSIM 신호와 이를 분석한 (c) 3차원 형상 측정 결과	34
그림 29. (a) 마이크로 렌즈 어레이의 (b) 임의의 한 점에 대한 CSSIM 신호와 이를 분석한 (c) 3차원 형상 측정 결과	36
그림 30. (a) 거친 표면 시편의 (b) 임의의 한 점에 대한 CSSIM 신호와 이를 분석한 (c) 3차원 형상 측정 결과	37
그림 31. (a) 이미징 광섬유 번들과 (b) 투과율 데이터시트	38
그림 32. 이미징 광섬유 번들의 투과 효율 실험 및 결과	39
그림 33. 이미징 광섬유 번들을 통해 본 시편 이미지 (a) 동전, (b) 게이지 블록	40
그림 34. 공간 패턴과 시편의 이미지가 동시에 전송된 결과	40
그림 35. 연속 주사형 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경 광학 구성	41
그림 36. 실제 CCD 카메라에서 획득되는 이미지	42
그림 37. (a) 500 μm 높이 차이를 가지는 게이지 블록의 (b) 임의의 한 점에서의 CSSIM 신호와 (c) 3차원 형상 측정 결과	44

그림 38. (a) 동전 한국은행 글자에서 ‘한’의 (b) 임의의 한 점에서의 CSSIM 신호와 (c) 3차원 형상 측정 결과	45
그림 39. (a) 소형화된 프로브로 측정된 (b) 임의의 한 점에 대한 CSSIM 신호, (c) 게이지 블록 측정 결과	47
그림 40. 이중 이미징 광섬유를 이용한 3차원 내시경 광학 구성	49
그림 41. 이중 프로브 실험 구성으로 획득된 CSSIM 신호	49
그림 42. 게이지 블록의 이중 프로브 실험 3차원 측정 결과	50
그림 43. 시편의 이미징 여부에 따른 가시도 차이 (a) BS, (b) PBS	52

표 목 차

표 1. 3차원 이미징 기술의 장, 단점	10
------------------------------	----

ABSTRACT

3D endoscopy based on structured illumination microscopy

By Hyo Mi Park

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

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

An endoscope is essential for observing the inside of the human body such as stomach and intestine to investigate any kinds of diseases without surgery and has been also used as an assistant device for a surgeon to look into surgical area in detail. In addition to medical applications, an endoscope or a boroscope is widely used in industrial fields for measurements and inspections of small defects through small holes. Even though interferometry and microscopy have become representative technologies obtaining 3D surface profile of a target as well as 2D features of a specimen, their typical microscopic configurations are not appropriate when the target is located inside a certain object because of their relatively bulky probes. Therefore, endoscopy or boroscopy is a promising technology to observe a target through a tiny hole in combination of imaging optics in medical and industrial fields because a small size of distal end can go through a small hole and the optical imaging fiber bundle can transfer the image to the imaging device.

Since a typical endoscope acquires 2D images only, however, it cannot provide the height and depth information in the acquired image. To overcome this

limitation, several types of the endoscopes have been developed through introducing conventional 3D measurement technologies such as stereoscopy and optical triangulation. A stereoscopic endoscope observes the target with two different sight angles like human eyes and it can achieve 3D imaging by the combination of two 2D images. It has the advantage of a large field of view and relatively simple configuration, but the measurement resolution is not so high because it has been developed as an observation tool. An endoscope based on the optical triangulation can improve the measurement resolution by the distant detection path from the illumination path but it is not avoidable to increase the size of the probe. Moreover, the conventional 3D endoscopes have the limitation for measurements of adjacent targets from the distal probes.

On the other hand, the probe of the typical endoscope consists of two fiber bundles for illumination and image detection except the additional motion part to change the position and direction of the probe. The illumination and detection pathways are completely distinguished and the size of the distal probe should increase up to a few tens of millimeters, which limits applications of the endoscope when the target should be measured through extremely small.

In this thesis, I propose an endoscopic technique for precise 3D imaging for medical and industrial applications. As the fundamental principle of 3D measurements, we adopt the continuously scanning structured illumination microscopy (CSSIM), which enables to obtain 3D sectional images by axial scanning. In order to reduce the size of distal probe end, the illumination and detection paths are designed as coaxial and a coherent imaging fiber bundle is used for transferring the illumination pattern to the target and vice versa.

The proposed 3D endoscope consists of two parts, CSSIM and probe parts. In the CSSIM part, the incoherent light preventing coherent noises such as diffractions and speckles, is illuminated on a sinusoidal amplitude grating or a grid and the structured light pattern is projected on the proximal end surface of the imaging fiber bundle. Then, the structured light is delivered by the flexible imaging fiber bundle and transferred to the sample surface by the imaging lens of the probe part. When the light is reflected off on the target, it returns back by the imaging

fiber bundle and goes to an imaging device. In this case, the whole system has 5 conjugate image planes; the grid surface, the proximal and distal ends of the imaging fiber bundles, the target surface and the imaging device plane. When the target is located on the best focal position, the structured light pattern can be projected on the target surface clearly and can be seen in the imaging device as well. In the imaging device, the obtained image contains the light pattern and the image of the target surface. When the target is axially moved from the focal position, both of the light pattern and the target image are blurred. Therefore, 3D imaging can be achieved by the detection of the highest visibility of the light pattern at each pixel of the imaging device.

In order to minimize the probe size, I designed the illumination and detection path coaxially and a GRIN lens was used as the probe imaging lens. In order to improve the contrast of the sinusoidal illumination pattern reflected off on the target, we used polarizing optical components and confirmed that the visibility of the pattern was able to be used in CSSIM. The gauge block specimen was used for the verification of the performance and it was confirmed that the 3D surface profile was successfully measured with 16.1 μm repeatability for gauge block specimen. As a measurement example, a Korean coin was measured and the 3D surface profile was also well reconstructed.

Key words : Continuously scanning structured illumination microscopy, 3D endoscope, 3D surface profile, imaging fiber bundle

제1장 서론

제1절 연구 배경

몸속을 진찰하기 위해 1805년 독일 의사 필립 보치치 (Phillipp Bozzini)가 구부러지지 않는 주석 튜브와 촛불을 전달하는 빛 가이드를 이용해 직장 (rectum) 등을 살피기 위한 경성 내시경 (borescope)을 개발한 이후, 내시경은 150여 년 동안 딱딱한 쇠파이프 형태의 구조로 인해 의료 분야의 응용에 있어 매우 제한적이었다 [1]. 하지만 유리섬유 (glass fiber)를 이용한 광섬유 (optical fiber)가 개발되면서, 유연한 빛 가이드를 가지는 내시경이 개발되었고, 이로 인해 내시경 산업에 획기적인 변화가 찾아왔다. 특히, 1957년 미국 의사 바질 이삭 헬슈위츠 (Basil Isaac Hirschowitz)가 직경 10~20 μm 의 가느다란 유리섬유를 약 10만 개 이상 묶어 빛을 전달하는 통로로 사용하고, 유리섬유관 끝에는 카메라를 연결해 인체 내부의 모습을 실시간으로 전달할 수 있는 연성 내시경 (fiberscope)의 시초로 'FiberScope'를 발명하면서 많은 연성 내시경 연구가 진행되었다 [2]. 그리고 현재 그림 1과 같이 위내시경 및 대장내시경과 같은 인체 내부의 관찰용 내시경과 수술시 환부 상태를 확인하기 위한 수술용 내시경으로 병원에서 널리 활용되고 있다.

한편, 내시경은 그림 2와 같이 산업계에서 측정, 검사방법의 하나로 기계나 설비를 분해하거나 파괴하지 않고 자동차 엔진, 소형 배관, 기계 내부, 좁은 공간 등의 내부 파손 상태나 막힘, 부식, 마모 또는 동작 상태 등을 관찰하기 위한 시각 장비로도 연구, 개발되고 있다 [3,4]. 이는 현장에서 장비를 해체하는데 드는 시간과 인력, 비용 절감 등을 가능하게 하므로 내시경의 필요성이 산업 분야 전반에 확산되고 있으며 향후 응용 분야는 더욱 확대될 전망이다.

하지만 기존의 내시경은 일반적으로 2차원의 이미지만 획득하여 시각화하기 때문에, 시편에 대해 보다 정밀한 측정 및 분석에 한계를 가진다. 그래서 이를 보완하기 위해 깊이감을 재현한 3차원 내시경의 필요성이 대두되었고, 스테레오 방식 등의 다양한 3차원 이미징 기술 및 측정 기술을 적용한 3차원 내시경이 개발되었다 [5]. 그러나 개발된 3차원 내시경은 주로 관찰에 목적을 두고 있기 때문에, 측정 대상에 대한 정량적인

분석에 적합하지 않으며 측정 분해능이 좋지 못한 단점을 가진다. 이와 더불어, 내시경의 이미지 획득 원리상 측정 프로브의 크기가 수십 밀리미터 수준에 머물고 있어 미세한 틈이나 구멍 안쪽의 측정이 불가능하다.

이렇듯 내시경은 의료용 및 산업용으로 다양한 분야에 활용 되고 있어 2차원 및 3차원 내시경과 같은 다양한 형태의 내시경이 연구, 개발되고 있다. 하지만 모든 응용 분야에서 범용적으로 활용할 수 있는 내시경은 존재하지 않기 때문에, 사용 용도에 따라 각기 다른 이미징 기술이 적용된 내시경이 요구된다. 특히, 고분해능을 가지는 동시에 측정 성능이 정량화되어 있는 소형 3차원 내시경의 경우 의료 및 산업 분야 전반에 걸쳐 미세 물체를 측정 검사하기 위한 수요가 꾸준히 증가하고 있음에도 불구하고, 이에 대한 개발 연구는 미흡한 상황이다.

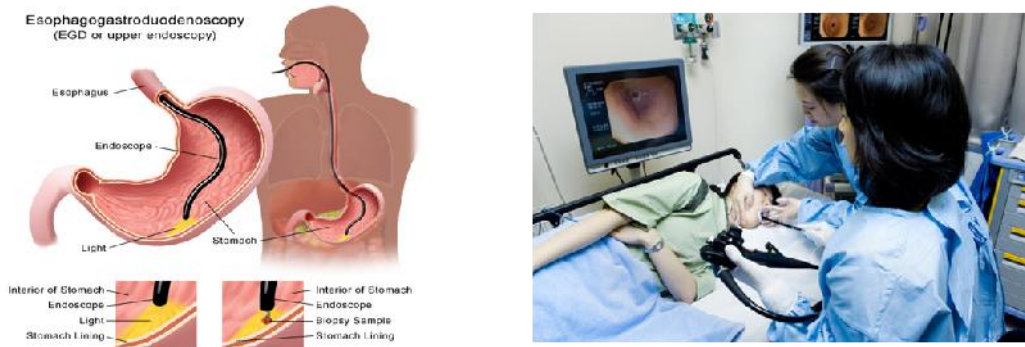


그림 1. 의료용 내시경의 응용 [6,7]



그림 2. 산업용 내시경의 응용 [8]

제2절 연구 현황

내시경은 구조 및 응용 등과 같은 여러 가지 특징에 따라 다양하게 분류할 수 있으나, 일반적으로 획득하는 정보에 따라 2차원 내시경과 3차원 내시경으로 나눌 수 있다. 또한, 3차원 내시경은 이미징 원리에 따라 스테레오 (stereo) 방식, 광 삼각법 (optical triangulation) 방식, 비행시간법 (time-of-flight) 방식 등으로 구분할 수 있다.

1. 2차원 내시경

2차원 내시경의 기본 구조는 프로브, 광원장치, 디스플레이로 구성 된다 [9]. 프로브는 내시경의 가장 핵심적인 부분으로 내시경의 구분 또한 프로브의 유연성에 따라 Rigid Type과 Flexible Type으로 나눌 수 있다. Flexible Type에서는 다시 영상을 전달하는 신호체계에 의해 그림 3과 같이 빛을 광섬유를 통해 전달하는 일반내시경과 내시경 선단부의 CCD (charge coupled device) 카메라를 전달 매체로 하여 모니터로 전송하는 전자내시경으로 나눌 수 있다. 일반내시경의 경우에는 영상을 육안으로 직접 확인하기 때문에 광선 경로 (light guide)와 영상 경로 (image guide)로 각각 구분되며, 전자내시경의 영상 경로에는 CCD 카메라가 부착된 특징이 있다. 이러한 2차원 내시경은 넓은 화각으로 인해 관찰 영역이 넓으며, 광선 경로와 영상 경로의 분리를 통해 더욱 선명한 이미지 획득이 가능하다. 하지만 2차원 내시경은 밝고 어두운 2차원 이미지만을 획득하기 때문에, 동일한 밝기를 가지는 3차원 물체에 대한 관찰이 어려운 동시에 낮은 분해능 및 깊이 정보가 결여되어 정밀 측정에 한계를 가진다.

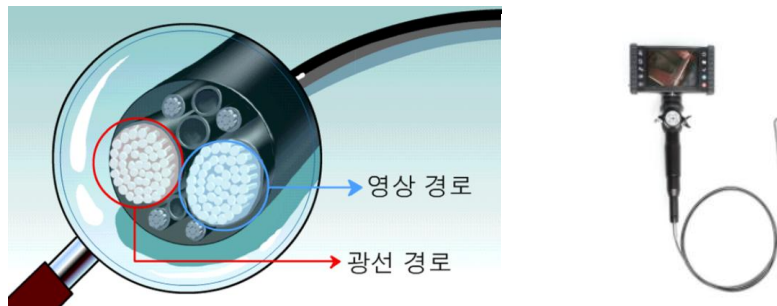


그림 3. 2차원 내시경 [10]

2. 3차원 내시경

현재 연구, 개발되고 있는 3차원 내시경은 측정 원리에 따라 그림 4와 같이 분류할 수 있다.

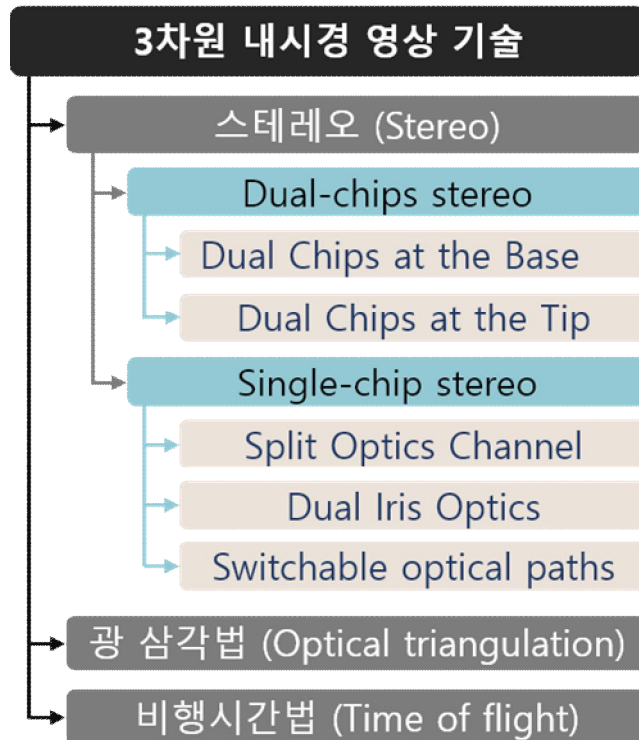


그림 4. 3차원 내시경 영상 기술들

2.1 스테레오(Stereo) 방식 3차원 내시경

스테레오 방식은 내시경 연구에 있어 3차원 내시경을 구현하는 대표적인 방법으로 인간의 시각 특성을 이용하여 실제로 우리가 자연에서 보고 느끼는 현실 및 깊이감을 그대로 표현하는 이미징 기술이다. 스테레오 이미징은 사람의 두 눈에 맺히는 상의 차이로 인하여 입체감을 느낄 수 있도록 하며, 스테레오 방식 3차원 이미징은 그림 5와 같이 두 개의 이미지 센서를 기반으로 구성되고, 동일한 측정 대상체의 위치와 이미지 센서 간의 기하학적 관계는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다 [11, 12]. 이때, 측정 대상체

표면의 임의의 점 P는 식 (1)의 R , B , α , β 를 이용하여 계산된다.

$$R = B \frac{\sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (1)$$

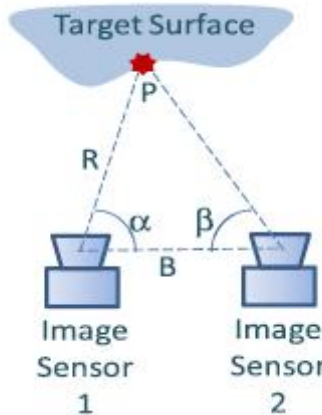


그림 5. Dual - chip stereo

이러한 스테레오 이미징 방식을 도입한 3차원 내시경은 이미지 센서의 부착 위치에 따라 각각 프로브의 근부 (proximal)에 위치하는 ‘Dual Chips at the Base’ [13, 14]와 프로브의 원부 (distal)에 위치하는 ‘Dual Chips at the Tip’ [15]으로 구분할 수 있다. 또한, 그림 6과 같이 단일 이미지 센서와 특수 설계된 광학 장치를 사용하여 분할된 이미지 센서의 두 영역에서 채널별로 영상을 획득하여 스테레오 이미징을 구현할 수 있다 [16]. 이때, 각 채널의 영상은 단일 이미지 센서의 분할된 두 영역에서 동시에 수집되기 때문에 전자 및 센서 설계에 큰 변화가 없이 구현이 가능한 동시에 시간에 따라 순차적으로 이미지를 수집하는 방식에 비교해 시간 지연 문제가 없으며, 두 개의 이미지 센서에서 발생할 수 있는 두 이미지의 밝기, 초점, 명암비에 대해 불일치가 없는 장점이 있다. 하지만 프로브의 구성이 비교적 복잡하고, 두 이미지를 이미지 센서에 정확하게 분할하기 어려운 한계가 있다. 또한, 채널의 간격이 좁아지면 3차원 효과가 감소하기 때문에 내시경 프로브 직경이 커져야 한다.

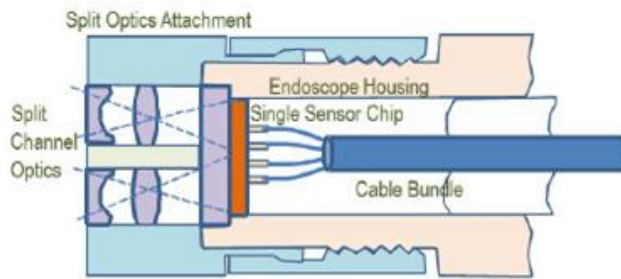


그림 6. Olympus stereo endoscope [16]

또 다른 단일 이미지 센서의 스테레오 방식 3차원 내시경에는 Dual Iris Optics [15]를 기반으로 한 구조가 연구되었다. 이는 단안 내시경 (monocular endoscope)과 유사하지만, 프로브의 내부에 특별히 설계된 dual iris가 존재하며 이를 이용하여 그림 7과 같이 두 개의 영상들이 단일 이미지 센서에 나뉘어 위치하게 되어 동시 획득이 가능하다. 비록 이러한 방식의 내시경은 비교적 간단한 구성으로 3차원 이미징이 가능하지만, 시스템에 적합한 dual iris의 광학 설계가 필수적이다.

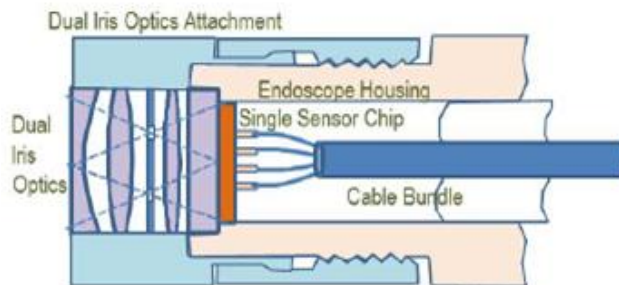


그림 7. Dual iris stereo endoscope [15]

한편, 그림 8과 같은 Switchable optical paths [17] 기반의 스테레오 방식 내시경은 단일 광학 채널의 구성에서 반원의 투명 회전판을 추가하여 단일 이미지 센서에서 두 개의 이미지를 수집한다. 이때, 투명 회전판이 광학 경로에 있지 않으면 이미지 센서는 “좌측” 이미지를 획득하고, 투명 회전판이 광학 경로에 있으면 투명 회전판의 굴절 때문에 광경로가 이동되어 “우측” 이미지가 획득되는 원리로, 투명 회전판의 회전과 이미

지 센서의 프레임 시간이 동기화되어 있어 좌측과 우측의 이미지가 순차적으로 획득하는 스테레오 방식으로 3차원 이미징이 가능해진다.

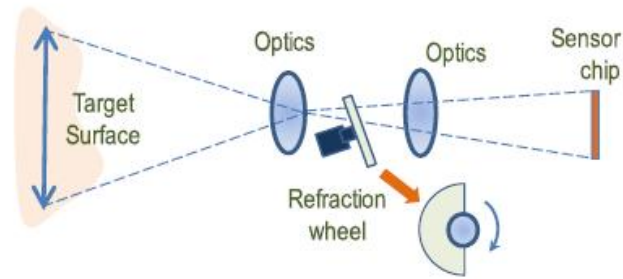


그림 8. Switchable optical paths [17]

하지만 이러한 스테레오 방식의 3차원 내시경들은 단지 스테레오 이미징 원리로 측정 대상 표면의 3차원 입체 영상만 생성할 수 있는 한계로 측정 결과에 대한 정량적 분석에 한계를 가진다. 동시에 측정 원리상 분해능이 낮은 단점과 더불어 프로브의 크기가 큰 특징이 있다.

2.2 광 삼각법(Optical Triangulation) 방식 3차원 내시경

광 삼각법은 빛이 공기나 굴절률이 일정한 매질에서 직선으로 진행되는 특성을 이용하여 입사광의 각도와 반사광의 각도, 거리 등의 기하학적 관계를 이용하여 변위 및 거리를 측정하는 기술이다. 광원의 빛은 일정한 각도를 가지고 측정 대상체에 조사되고, 빛의 반사 법칙에 따라 결정되는 각도와 광 검출기에 도달하는 빛의 위치를 측정하면 측정 대상체의 높이를 측정할 수 있다. 일반적으로 이러한 광 삼각법을 이용한 3차원 형상 측정 기술은 “패턴 조명 (structured light)”을 이용하여 광원의 일정한 패턴을 기준으로 반사한 광의 변화된 패턴을 검출하고 이로부터 높이 정보를 추출한다. 광 삼각법을 이용한 3차원 내시경의 경우에도 이와 유사하게 패턴 조명을 조사하여 그림 9와 같이 구성되며 [18, 19], 공간적으로 변하는 패턴 조명은 특수 프로젝터 또는 광변조기에 의한 변조 광원에 의해 생성된다. 이러한 패턴 조명을 이용한 3차원 내시경은 패턴 조명의 왜곡으로부터의 정보를 가지고 3차원 형상을 계산하기 때문에, 패턴 조명

을 만들어주는 조명부와 이미지를 획득하는 카메라의 경로가 두 개로 나누어져야 하며, 두 경로 사이의 기하학적 관계의 부정확성으로 측정 결과를 분석하는 과정에서 오차가 발생할 수 있다.

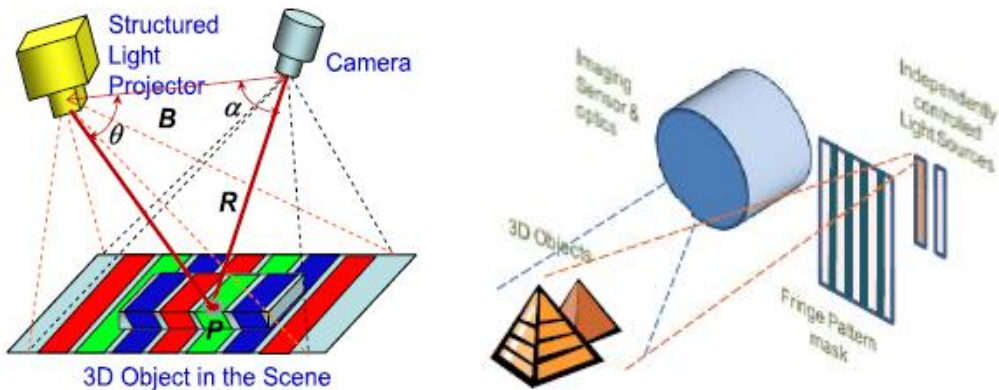


그림 9. 패턴 조명을 이용한 광 삼각법 3차원 형상 측정 및 내시경 원리

2.3 비행시간법(Time of Flight) 방식 3차원 내시경

한편, 스테레오 방식과 광 삼각법 방식의 3차원 내시경과는 달리 영상 경로와 광선 경로를 일치시킨 단일 광학 채널을 가진 단안 내시경 기반의 3차원 내시경에 대한 연구도 진행되었으며, 비행시간법 기반 영상 장치 (time of flight (ToF) camera) [20, 21]를 활용하여 3차원 내시경이 구현되었다. 비행시간법은 가장 기본적인 광기반 거리 측정 기술로 LIDAR 등 많은 분야에서 응용되고 있으며 [22, 23], 그림 10과 같은 간단한 광학 구성으로 식 (2)와 같은 빛이 이동한 시간 t_L 과 거리 R , 빛의 속도 c 의 관계를 통해 거리를 계산한다.

$$t_L = \frac{2R}{c} \quad (2)$$

비행시간법은 빛의 속도로 인한 시간 분해능의 한계로 주로 긴 거리를 측정하는 용도로 활용이 되고 있어, 다른 3차원 이미징 기술들 보다 수 미터에서 최대 약 60 m의

범위까지 측정 가능한 장점이 있으나 거리 분해능은 약 5-10 mm 정도로 낮은 편이며 다른 3차원 내시경들과 비교하면 응용에 한계를 가진다.

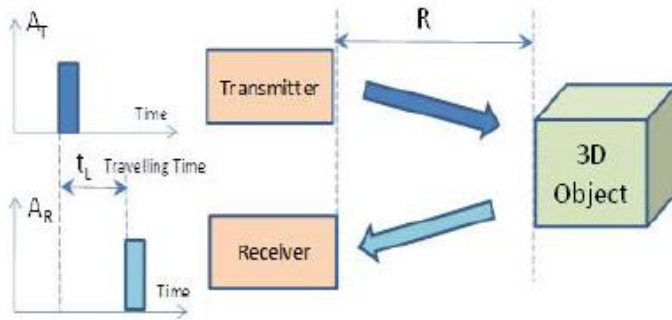


그림 10. 비행시간법의 측정 원리 [5]

요약하자면, 스테레오 방식을 이용한 스테레오스코피는 사람의 두 눈에 맺히는 상의 특성을 이용하여 입체감을 표현하는 이미징 기술로 넓은 FOV를 가지지만, 측정 결과에 대한 정략적 분석의 한계와 측정 원리상 비교적 낮은 분해능을 가지게 된다. 광 삼각법은 빛의 직진성을 이용하여 입사각과 반사각의 기하학적 관계를 이용한 측정 기술로 높이 정보를 계산하기 때문에 높은 분해능으로 측정할 수 있지만 광원과 카메라의 경로가 분리되기 때문에 프로브의 크기가 커지고, 두 경로의 기하학적 관계가 정확해야 한다. 마지막으로 비행시간법은 빛이 이동한 시간과 거리, 빛의 속도의 관계를 통해 주로 긴 거리를 측정하는 기술로 3차원 내시경으로 사용이 되지만 원리상 짧은 거리는 측정이 잘 안되는 한계를 가지게 된다. 앞서 설명한 내용을 표 1에 요약하였으며 단점을 보완하고자 프로브의 소형화와 높은 분해능으로 측정 가능한 내시경을 개발하고자 한다.



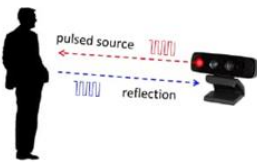
	측정 영역	분해능	비고
Stereoscopy 	-	-	<ul style="list-style-type: none"> • Observation • Large field of view • Relatively low resolution
Optical triangulation 	10 ~ 100 <i>mm</i>	100 μm ~ 1 <i>mm</i>	<ul style="list-style-type: none"> • High resolution • Relatively large size
Time of flight 	> ~ 1 <i>m</i>	5 ~ 10 <i>mm</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Distance measurements • Limit for short range

표 1. 3차원 이미징 기술의 장, 단점

제3절 연구 목표 및 내용

본 논문에서는 기존에 개발된 내시경들을 분석하여 기존의 내시경들과는 달리, 고분해능과 프로브 소형화에 초점을 맞춘 3차원 내시경에 대한 연구를 진행한다. 3차원 형상 측정 원리로는 높은 분해능의 패턴 조사 현미경 원리를 적용하고, 단일 광섬유를 이용하여 광선 경로와 영상 경로를 일치시킨 동축의 이미징 광섬유로 소형화된 내시경을 개발하고자 한다. 그래서 본 연구는 패턴 조사 현미경을 이용한 3차원 내시경을 제안하고, 이를 설계 및 구현하여 시스템을 구성하고 다양한 시편의 측정을 통해 시스템을 검증하는 것을 목표로 한다.

본 연구의 전체 목표 달성을 위한 세부 연구 내용은 다음과 같다.

- 기존 3차원 내시경의 문제점 파악 및 개선 방안 제안
- 패턴 조사 현미경의 기본 원리 이해
- 내시경 프로브의 소형화를 위한 단일 이미징 광섬유 사용
- 제안하는 시스템의 3차원 형상 측정 및 결과 분석

본 논문은 제2장에서 시스템의 핵심 요소인 패턴 조사 현미경과 이미징 광섬유 기반 내시경 프로브에 관한 이론 내용이며, 제3장은 3차원 내시경의 구성 및 실험 결과 분석, 제4장 고찰 및 논의, 그리고 제5장은 결론으로 구성되어 있다.

제2장 패턴 조사 현미경을 이용한 3차원 내시경

제1절 패턴 조사 현미경

1. 패턴 조사 현미경(Structured Illumination Microscopy, SIM)

패턴 조사 현미경 (structured illumination microscopy, SIM) [24, 25] 혹은 구조광 조사 현미경은 일반적인 현미경 (wide-field microscopy)과는 달리 측정 대상체에 조사하는 광의 공간적 패턴을 이용하여 3차원 측정이 가능한 동시에 공간 분해능을 향상시킬 수 있는 장점을 가진다. 이러한 패턴 조사 현미경은 일반적으로 그림 11과 같은 광학 구성을 가지며, 광원부에 패턴 조명을 위한 격자 등과 같은 장치가 삽입되고 현미경 광학계와 CCD 카메라 등의 영상획득 장치가 포함된다. 이때, 패턴 조명을 위한 격자는 위상 천이 (phase shifting)를 위해 횡방향 (lateral direction)으로 주사 (scanning)되고, 프로브 및 측정 물체는 물체의 3차원 형상 측정을 위해 종방향 (axial direction)으로 주사된다. 이러한 주사 방식의 현미경 작동 원리는 현재 산업계에서 3차원 형상 측정으로 널리 활용되고 있는 공초점 주사 현미경 (confocal scanning microscopy) [26]과 매우 유사한 특징을 가지지만, 기본적으로 점 측정 방식에 기인한 공초점 주사 현미경과 비교하면 면적 측정을 통한 3차원 측정이 가능한 장점이 있다.

그림 11을 살펴보면, 광원에서 나온 빛은 사인파 (sinusoidal amplitude pattern)와 같은 일정한 공간 투과 분포를 가지는 패턴에 입사한 후 패턴 조명이 되며, 현미경 광학계에 입사하여 측정 대상에서 반사한 후, 결상 광학계 (imaging optical system)를 통해 CCD (charge coupled device) 카메라에서 결상된다. 이때, 광원부의 공간적인 사인파 패턴과 측정 대상체의 표면 그리고 CCD 카메라의 촬상면은 광학적으로 공액 (conjugate) 관계에 놓이게 되며, 측정 대상의 표면에 초점이 맺히는 경우, CCD 카메라에서는 사인파 형태의 광분포와 함께 측정 대상체의 표면 영상이 선명하게 나타나게 된다. 그래서 이러한 특징을 이용하면 그림 12와 같이 선명한 사인파 패턴의 가시도 (visibility)를 이용하여 측정 대상체의 3차원 형상을 측정할 수 있다. 또한, 패턴 조사 현미경에서 패턴 조명은 측정 대상의 표면을 국지적으로 제한하는 특징으로, 초점이

맺지 않은 곳에서 반사되는 빛을 차단할 수 있는 장점을 가진다.

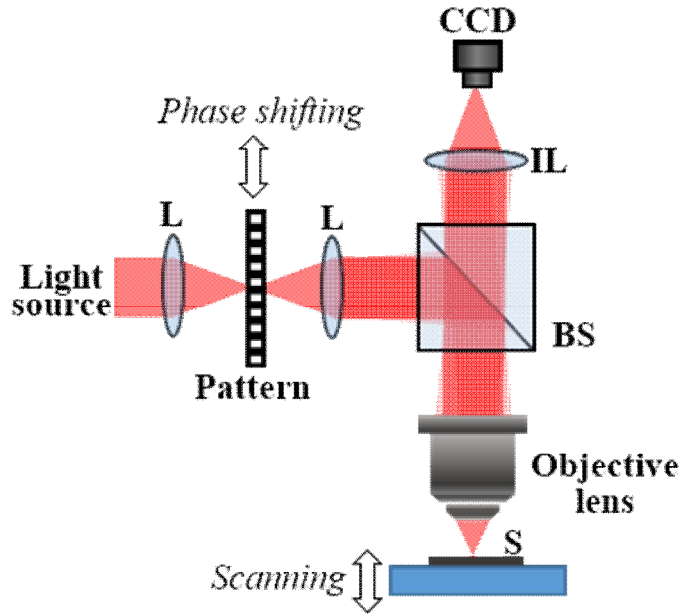


그림 11. 패턴 조사 현미경의 광학 구성; L, lens; BS, beam splitter; S, specimen; IL, imaging lens

이러한 원리의 패턴 조사 현미경은 다음과 같은 수식을 통해 보다 명확하게 이해될 수 있다. 앞서 설명한 것과 같이 광원에서 나온 빛은 사인과 분포를 가지는 패턴인 $S(t_0, w_0)$ 에 조사된 후, $\tau(t_1, w_1)$ 의 반사율을 가지는 측정 대상 표면에서 반사되어 CCD 카메라의 이미지 평면 (t, w) 에서 검출된다. 이때 획득되는 영상 $I(t, w)$ 은 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$I(t, w) = \iint S(t_0, w_0) \left| \iint h_1(t_0 + t_1, w_0 + w_1) \right. \quad (3)$$

$$\left. \times \tau(t_1, w_1) h_2(t_1 + t, w_1 + w) dt_1 dw_1 \right|^2 dt_0 dw_0$$

여기서 $h_{1,2}$ 는 각각 공간 패턴과 측정 대상체, 측정 대상체와 CCD 카메라 사이에 위치

하고 결상 렌즈들의 점 확산 함수 (point spread functions)를 나타낸다.

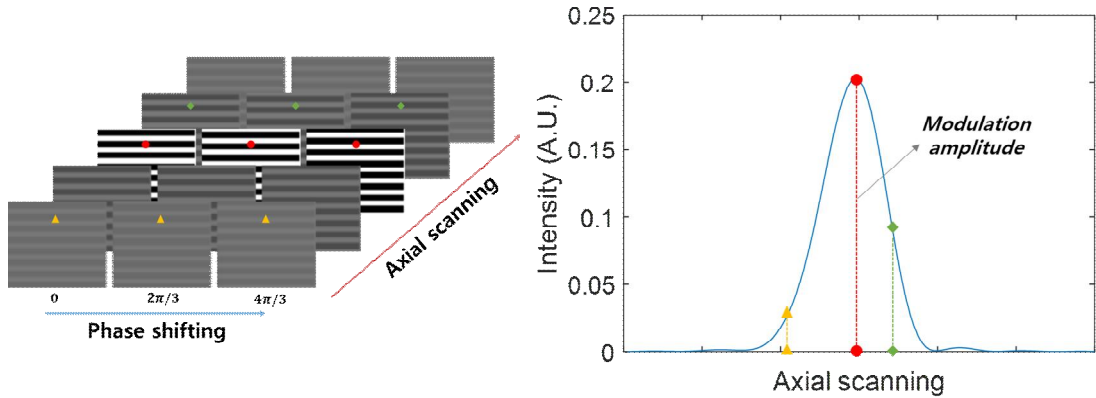


그림 12. 패턴 조사 현미경의 원리

한편, 패턴 조사 현미경에서 $S(t_0, w_0)$ 는 1차원적 격자로 가정할 수 있고, 이를 수식적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S(t_0, w_0) = 1 + m \cos(\tilde{\nu}t_0 + \phi_0) \quad (4)$$

여기서 m 은 공간 패턴에서의 변조 깊이, ϕ_0 는 초기 공간 위상, $\tilde{\nu}$ 는 패턴의 정규화된 공간 주파수를 나타낸다. 이 경우, 식 (4)를 식 (3)에 대입하여 간단히 정리하면

$$I(t, w) = I_0 + I_c \cos \phi_0 + I_s \sin \phi_0 \quad (5)$$

로 표현할 수 있으며, 여기서 I_0 은 $S=1$ 의 경우 식 (3)에 의해 계산되는 광강도이고, I_c 와 I_s 은 각각 식 (4)의 패턴에 해당하는 $m \cos(\tilde{\nu}t_0)$ 와 $m \sin(\tilde{\nu}t_0)$ 에 의한 광강도를 나타낸다. 패턴 조사 현미경은 측정 대상을 종축으로 구동하면서 획득한 이미지들 중에서 패턴의 가시도가 가장 높을 때의 위치를 검출하여 3차원 형상을 측정하기 때문에, 식 (5)에서 가시도 $I_p = (I_c^2 + I_s^2)^{1/2}$ 를 추출해야 한다. 이를 위해, 패턴 조사 현미경은 간

접계에서 널리 이용되는 위상 천이 (phase shifting) 방법을 이용하여, 식 (5)의 공간 위상, ϕ_0 를 $0, 2\pi/3, 4\pi/3$ 만큼 변화시키면서 획득되는 3개의 이미지 I_1, I_2, I_3 를 이용하면 식 (6)과 같이 I_p 를 계산할 수 있다.

$$I_p = [(I_1 - I_2)^2 + (I_1 - I_3)^2 + (I_2 - I_3)^2]^{1/2} \quad (6)$$

또한, 식 (6)은 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$I_p = |I_1 + I_2 \exp(j\frac{2\pi}{3}) + I_3 \exp(j\frac{4\pi}{3})| \quad (7)$$

패턴 조사 현미경은 측정 대상이 종축으로 구동하면서 식 (6)과 (7)를 이용하여 매 위치에 따른 픽셀별 가시도를 추출하고, 각 픽셀에서 획득된 가시도의 정점을 결정하여 3차원 높이 정보를 획득한다. 그림 13은 시뮬레이션을 통해 패턴 조명으로 임의의 형상을 가지는 물체에 조사하여 획득되는 이미지 및 위상 천이를 통해 획득한 3장의 이미지를 보여준다.

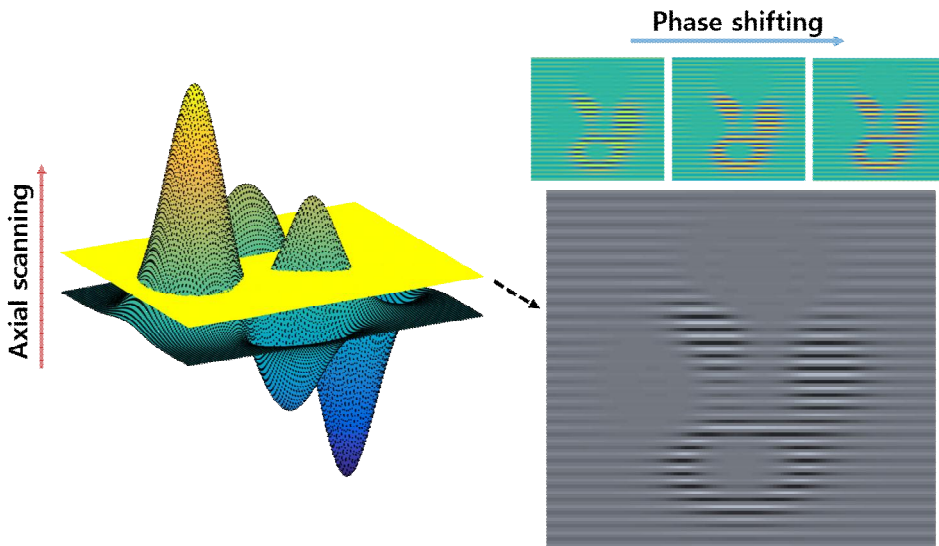


그림 13. 시뮬레이션을 통한 측정 대상 및 패턴 조사 현미경의 위상 천이 이미지

그림 13에서 알 수 있듯이, 시뮬레이션을 통해 생성된 3차원 물체의 경우, 초점 위치에 있는 부분에서는 패턴 역시 선명하게 나타나고 있음을 확인할 수 있고 초점의 위치에서 벗어나 있는 부분들은 패턴이 희미하게 보이거나 전혀 보이지 않고 있음을 알 수 있다. 또한, 패턴의 위상 천이를 통해 그림 14(a)와 같이 가시도에 해당하는 이미지 추출이 가능하였고, 종축 구동에 따른 가시도의 변화량에서 각 픽셀별 정점의 위치로부터 그림 14(b)와 같은 3차원 형상을 복원할 수 있음을 시뮬레이션 결과로 확인하였다.

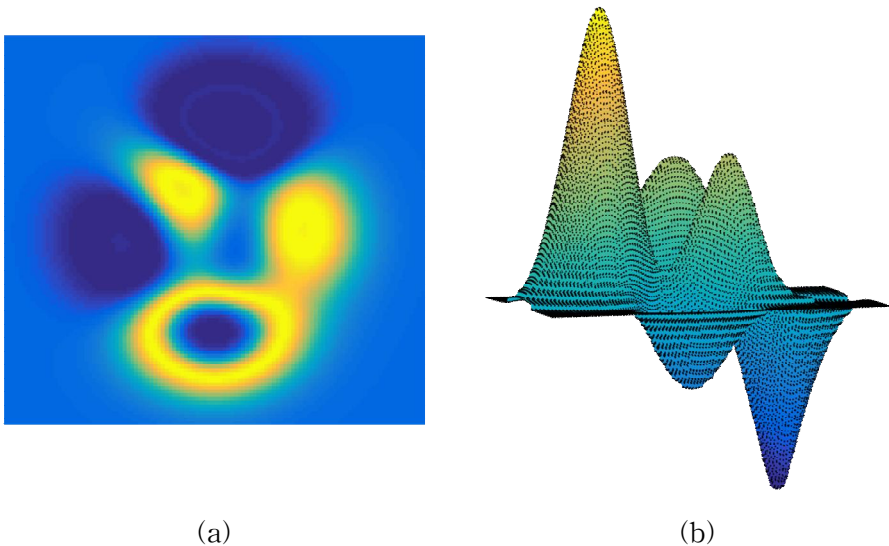


그림 14. (a) 임의의 종축 위치에서의 가시도 이미지, (b) 패턴 조사 현미경의 원리를 적용한 측정 대상의 3차원 복원

2. 연속 주사형 패턴 조사 현미경(Continuously Scanned Structured Illumination Microscopy, CSSIM)

기존의 패턴 조사 현미경은 각 픽셀별 가시도의 정점을 추출하는 것으로 3차원 형상 측정이 가능하지만, 가시도를 획득하기 위해 측정 대상의 종축 위치마다 위상 천이를 위한 여러 장의 이미지를 획득해야 하는 한계를 가진다. 이로 인해, 패턴 조사 현미경은 연속적인 (continuous) 측정이 아닌 정지 및 측정 (stop-and-measure) 방식으로 데이터를 수집하며 측정 시 오랜 시간이 필요하다. 최근 들어, 이러한 패턴 조사 현미경

의 단점을 보완하기 위한 새로운 구동 방식의 패턴 조사 현미경의 연구가 진행되었다. 그림 15와 같이 측정 속도를 개선하기 위한 연속 주사형 패턴 조사 현미경 (continuously scanned structured illumination microscopy, CSSIM) [27]은 위상 천이와 측정 대상의 종축 구동을 동기화 (synchronization) 하여, 기존의 패턴 조사 현미경의 정지 및 측정 방식이 아닌 연속 측정 방식으로 데이터를 획득하여 측정 속도를 현저히 개선한다. 연속 주사형 패턴 조사 현미경의 광학 구성은 기존의 패턴 조사 현미경과 크게 차이가 없으며, 단지 구동부가 서로 동기화되어 있는 부분이 다르다. 이로 인해 기존의 위상 천이 알고리즘을 적용하는 기존의 패턴 조사 현미경과는 다른 분석 방법으로 측정 대상의 3차원 형상을 측정한다.

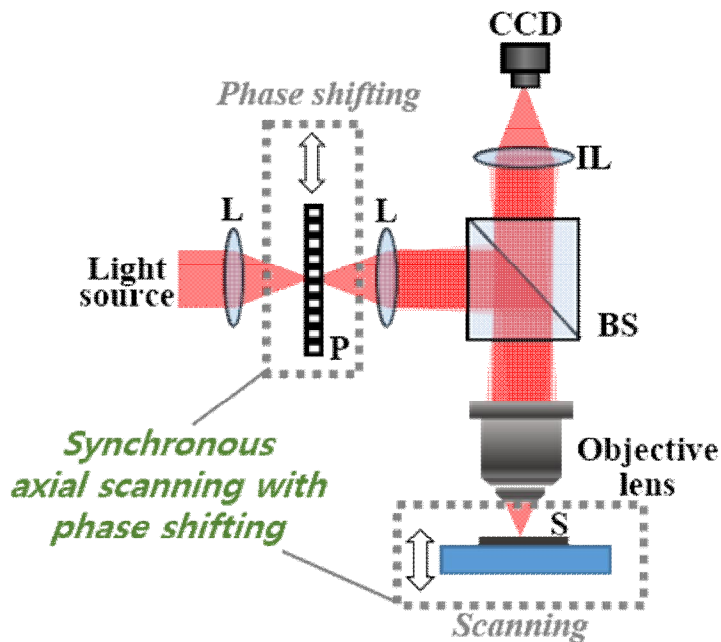


그림 15. 연속 주사형 패턴 조사 현미경의 광학 구성; L, lens; P, pattern; BS, beam splitter; S, specimen; IL, imaging lens

연속 주사형 패턴 조사 현미경에서는 위상 천이와 측정 대상의 종축 구동이 동시에

이루어지기 때문에, 매 종축 위치에서는 단일 이미지만을 획득하며 이러한 이미지들을 통해 각 픽셀에서 획득되는 광강도 신호 (CSSIM 신호)는 그림 16과 같은 형태를 보인다. 이러한 CSSIM 신호는 크게 포락선 (envelope)과 변조 신호 (modulation signal)로 구분되며, 이때 변조 신호는 연속 주사형 패턴 조사 현미경에서의 위상 천이를 위한 패턴의 횡축 구동에 의해 형성된다. 한편, 포락선은 기존의 패턴 조사 현미경의 경우와 같이 측정 대상에 대한 초점심도를 나타내며, 이를 통해 패턴의 가시도가 결정된다. 결과적으로 연속 주사형 패턴 조사 현미경에서 획득되는 각 픽셀별 신호의 포락선은 기존의 패턴 조사 현미경의 가시도와 동일하며, 카메라의 모든 픽셀의 포락선 정점의 위치로부터 측정 대상의 3차원 형상 측정이 가능해진다.

Synchronous axial scanning with phase shifting

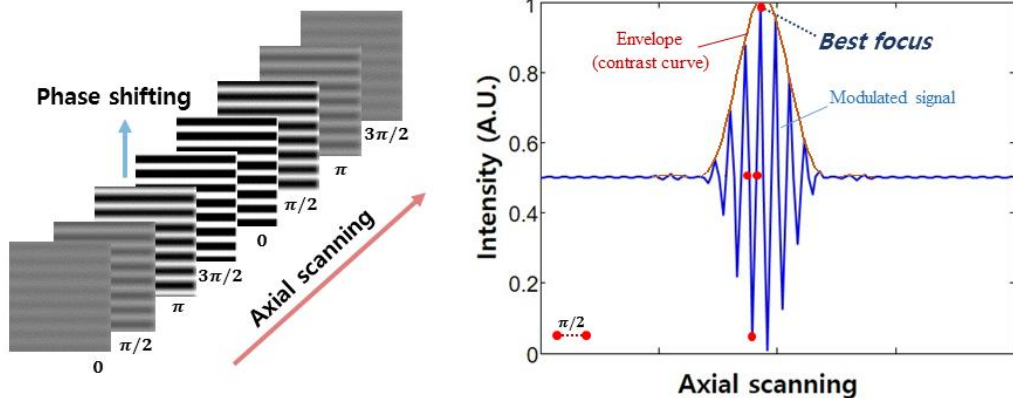


그림 16. 연속 주사형 패턴 조사 현미경의 원리

CSSIM 신호는 변조 신호라는 특징을 이용하면, 푸리에 변환 (Fourier transformation)과 같은 주파수 해석법을 이용하여 포락선 (가시도)만을 추출할 수 있다. 실제로 CSSIM 신호는 산업계에서 널리 활용되고 있는 백색광 주사 간섭계 (white light scanning interferometer, WLSI) [28]의 간섭 신호와 유사함을 보인다. 비록, 백색광 주사 간섭계의 변조 신호는 사용하는 광원의 중심 파장에 따른 간섭을, 포락선은 광원의 파장 분포에 따른 정보를 포함하고 있는 점에서 연속 주사형 패턴 조사 현미경과 큰 차이를 보이지만, 획득한 신호에서 포락선 정점의 위치를 추출해야 한다는 점에

서 분석 원리는 동일하다. 백색광 주사 간섭계에서 높이를 추출하기 위한 방법으로는 위상 정점 추출과 포락선 정점 추출 방법이 있으며, 이 중에서 포락선 정점 추출 방법은 연속 주사형 패턴 조사 현미경의 분석에 그대로 적용할 수 있다. 본 연구에서는 CSSIM 신호 분석을 위해 기존의 백색광 주사 간섭계에서 활용되고 있는 포락선 정점 추출 방법을 이용하였으며, 그 중에서 푸리에 변환에 기반을 둔 다음과 같은 2가지 측정 알고리즘으로 분석을 수행하였다.

- 푸리에-역푸리에 변환 (Fourier transformation-inverse Fourier transformation)을 이용한 방법
- 푸리에 영역 분석 (Fourier domain analysis)을 이용한 방법

2.1 푸리에-역푸리에 변환 (Fourier transformation-inverse Fourier transformation)을 이용한 방법

푸리에 변환은 일반적으로 전기, 전자 분야에서 신호 해석에 이용되고 있는 수학적 기법으로 임의의 시간 영역의 신호에 대해 주파수 분석이 가능한 특징이 있다. 임의의 함수 $f(t)$ 에 대한 푸리에 변환 함수 $F(f)$ 는 수학적으로 다음과 같이 정의된다.

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\exp(-2\pi ft)dt \quad (8)$$

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f)\exp(2\pi ft)df \quad (9)$$

식 (8)은 $f(t)$ 함수에 대한 푸리에 변환의 수학적 표현이며, 식 (9)는 이에 대한 역푸리에 변환을 나타낸다. 식 (8)에서 알 수 있듯이, 시간 영역의 신호인 $f(t)$ 는 푸리에 변환을 통해 주파수 신호인 $F(f)$ 로 변환되며, 이를 통해 $f(t)$ 신호에 대한 주파수 분석을 할 수 있다. 그리고 이러한 푸리에 변환은 본 연구의 CSSIM 신호 분석에 매우 효율적이다.

푸리에-역푸리에 변환을 이용한 방법을 설명하기 위해 CSSIM 신호 (I)를 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$I(z) = I_0 + G(h-z)\cos(2\pi f_s z) \quad (10)$$

여기서 I_0 는 CSSIM 신호의 평균 광강도를, $G(h-z)$ 는 측정 대상의 종축 (z) 구동에 따른 높이 (h)에 대한 포락선 함수를 나타낸다. 식 (10)의 $\cos(2\pi f_s z)$ 함수는 패턴의 위상 천이와 측정 대상의 종축 구동에 의해 생성되는 CSSIM 신호의 변조 성분이며, f_s 는 CSSIM 신호의 공간 주파수 (spatial frequency)를 가리킨다. 이때, 식 (10)을 푸리에 변환으로 표현하면,

$$i(f) = FT[I(z)] = I_0\delta(f) + g(f)\exp(-2\pi hf) \otimes \left[\frac{\delta(f-f_s) + \delta(f+f_s)}{2} \right] \quad (11)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 f 는 z 에 대한 푸리에 변환 변수로 공간 주파수이며, $i(f)$, $g(f)$ 는 각각 $I(z)$ 와 $G(z)$ 의 푸리에 변환 결과이다. 이때, CSSIM 신호에서 추출하고자 하는 변수는 높이 정보인 h 이며, 이를 계산하기 위해 주파수 대역 통과 필터 (band-pass filter)를 적용하여 다음과 같은 성분 ($i_F(f)$)만을 추출한다.

$$i_F(f) = g(f)\exp(-2\pi hf) \otimes \left[\frac{\delta(f-f_s)}{2} \right] \quad (12)$$

이후, 식 (12)를 다시 역푸리에 변환하면,

$$I_F(z) = IFT[i_F(f)] = \frac{1}{2}G(h-z)\exp[i(2\pi f_s z)] \quad (13)$$

가 된다. 이때 식 (13)을 살펴보면, $I_F(z)$ 는 복소 함수 (complex function) 형태를 가지고 있으며, $I_F(z)$ 의 절댓값이 CSSIM 신호의 포락선을 나타내고 있음을 확인할 수 있

다. 그래서 식 (13)에서 $I_F(z)$ 의 절댓값을 통해 포락선 $G(h-z)$ 를 계산할 수 있고, $G(h-z)$ 의 정점은 식 (14)와 같은 무게 중심법 (center of gravity) 방법을 이용하여 추출할 수 있다.

$$y_c = \frac{\sum x_k y_k}{\sum x_k} \quad (14)$$

그림 17은 푸리에-역푸리에 변환을 이용하여 CSSIM 신호를 분석하는 과정을 모식도로 나타내고 있으며, 그림 18은 푸리에-역푸리에 변환 방법을 통해 3차원 형상 측정에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다.

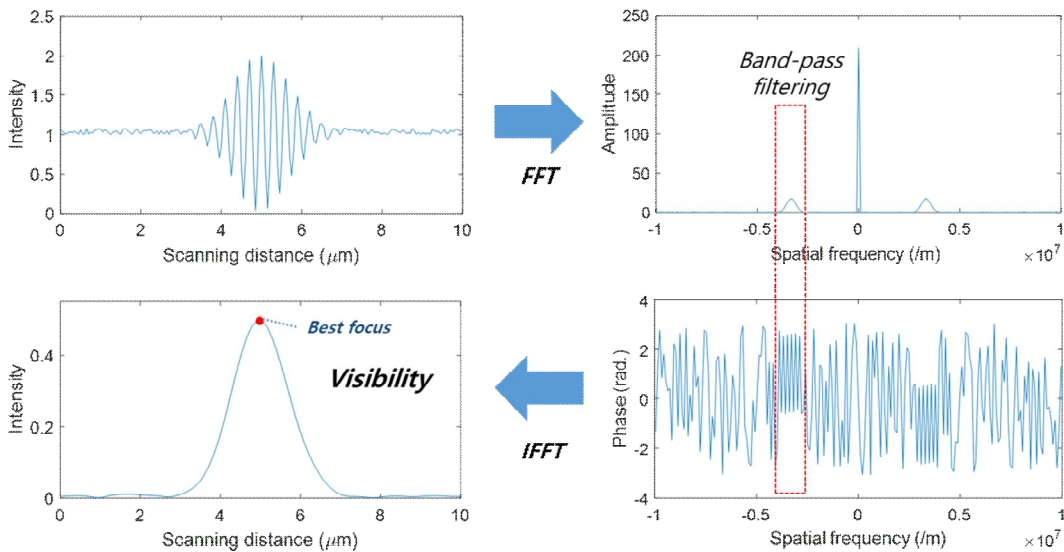


그림 17. FFT와 IFFT 분석 과정

시뮬레이션에서는 그림 18에서 알 수 있듯이 연속 주사형 패턴 조사 현미경의 구동 원리에 맞추어 기존의 패턴 조사 현미경과는 달리 측정 대상의 종축 위치에서 단일 이미지만을 획득하도록 구성하였으며, 그림 17의 분석 과정을 통해 각 픽셀별로 포락선의 점의 위치를 추출하여 3차원 형상을 복원하였다.

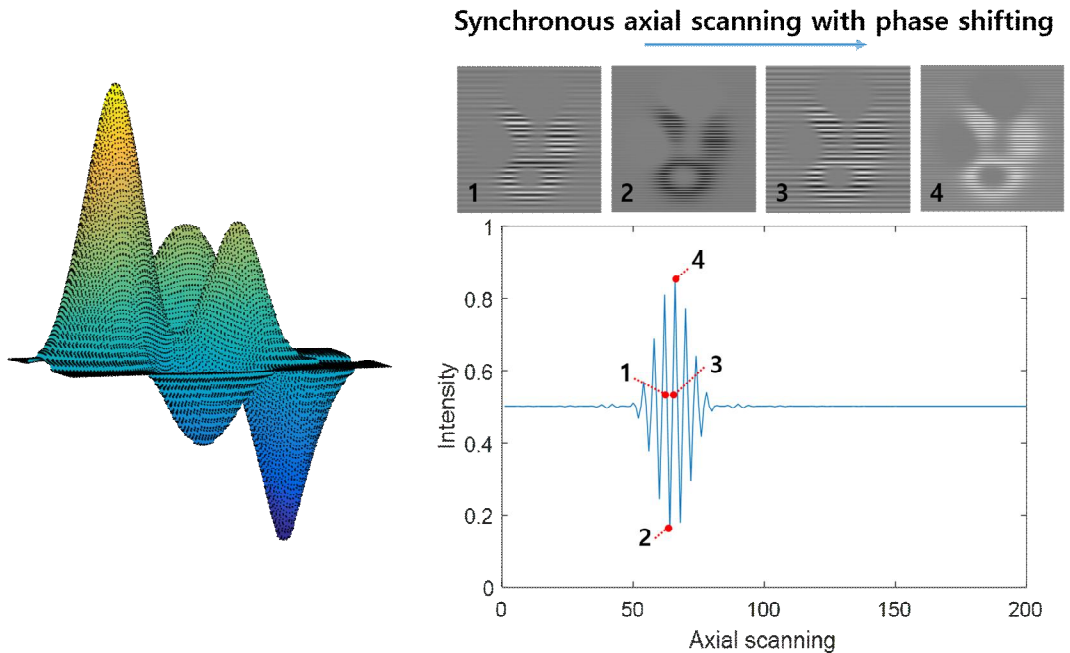


그림 18. 시뮬레이션을 통해 획득된 임의의 한 점에 대한 가시도

2.2 푸리에 영역 분석(Fourier domain analysis)을 이용한 방법

푸리에 영역 분석 방법은 백색광 주사 간섭계의 간섭 신호를 해석하는 방법 중 하나로 간섭 신호를 푸리에 변환하여 얻은 푸리에 위상에서 공간 주파수에 대한 위상의 기울기를 통해 간섭 신호의 포락선 첨두 (envelope peak)를 추출한다. 이는 앞서 설명한 푸리에-역푸리에 변환을 이용한 분석법과 그 과정이 유사하나, 한 번의 푸리에 변환만을 이용하며, 위상 성분을 이용하여 포락선의 정점을 추출한다는 점에서 차이를 보인다. 이를 설명하기 위해, CSSIM 신호를 푸리에 변환 후 주파수 대역 통과 필터를 적용한 식 (12)를 다시 표현하면 다음과 같다.

$$i_F(f) = \frac{g(f-f_s)}{2} \exp(-2\pi h f) \quad (15)$$

식 (15)를 살펴보면, CSSIM 신호에서 측정하고자 하는 h 는 $i_F(f)$ 의 위상 성분에 포함된 것을 알 수 있으며, 이러한 특징을 이용하면 h 의 추출이 가능하다. 식 (15)의 $i_F(f)$ 의 위상 ($\phi(f)$)은 자연로그 함수 및 복소수의 특징을 이용하여 추출할 수 있으며 h 는 식 (16)과 같이 $\phi(f)$ 의 f 에 대한 기울기로 계산된다.

$$h = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{df} \quad (16)$$

그림 19는 푸리에 영역 분석 방법을 이용하여 CSSIM 신호를 분석하는 과정을 나타낸다. 이때, 특이할 만한 부분은 $i_F(f)$ 의 위상인 $\phi(f)$ 를 추출함에 있어, 그 결과가 그림 19에서 보는 바와 같이 접힌 (wrapped) 위상이라는 점으로, 이는 사인파와 코사인파와 같은 함수가 주기를 가지고 있기 때문에 위상이 계속 커지더라도 그 결과는 주기에 따라 결과가 반복적으로 나타난다는 특징에 기인한다. 그래서 푸리에 영역 분석 방법에서는 위상을 추출한 이후에 접힌 위상을 펼치는 (unwrapped) 과정이 필요하며, 이를 통해 얻은 위상으로부터 기울기를 계산하여 식 (16)으로 높이 값을 산출한다.

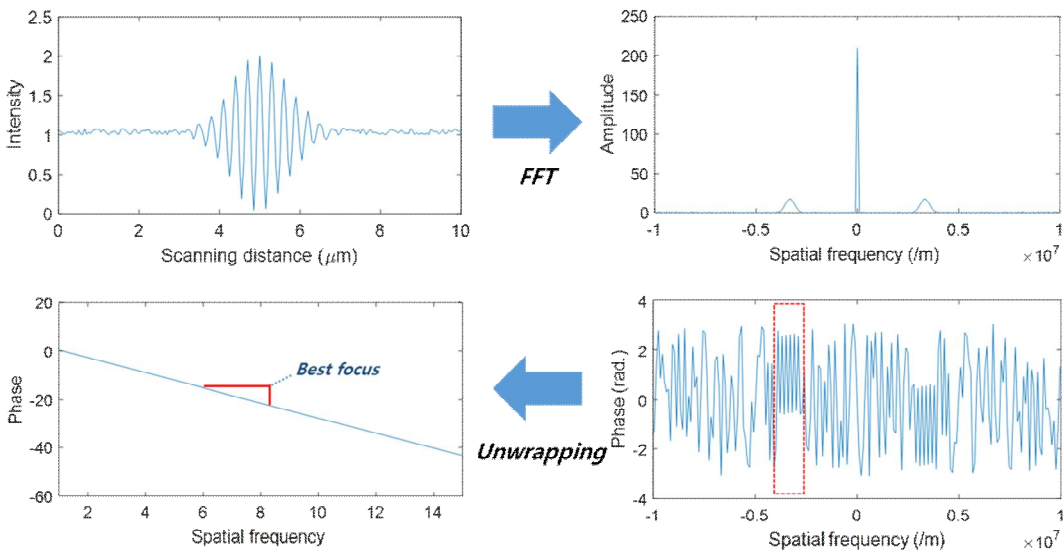
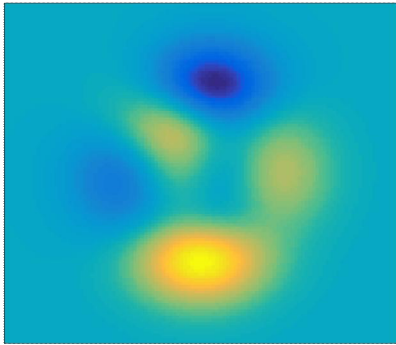
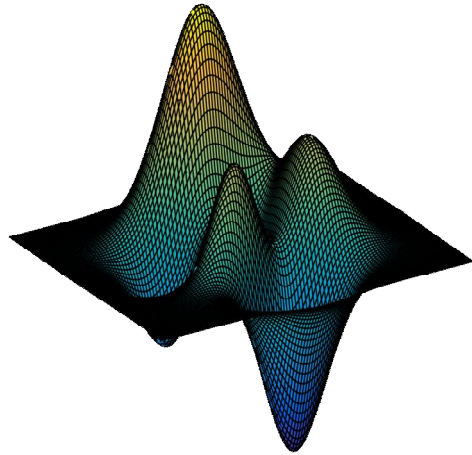


그림 19. 푸리에 영역 분석 과정

그림 20은 푸리에 영역 분석을 기반으로 한 시뮬레이션 결과를 나타내며, 분석 결과 측정 대상에 대한 3차원 형상 측정이 수행될 수 있음을 확인하였다.



(a)



(b)

그림 20. (a) 임의의 종축 위치에서의 가시도 이미지, (b) 연속 주사형 패턴 조사 현미경을 적용한 측정 대상의 3차원 복원

제2절 이미징 광섬유 기반 내시경 프로브

본 연구에서는 연속 주사형 패턴 조사 현미경의 원리와 내시경 광학계의 결합으로 고분해능 3차원 내시경을 제안한다. 이때, 중요한 요소 중의 하나는 연속 주사형 패턴 조사 현미경의 원리상 조명의 공간적 패턴이 측정 대상의 표면에 전달될 수 있는 지에 대한 여부이다. 이와 더불어, 측정 대상의 표면에 해당하는 가시도 이미지 역시 카메라로 전달될 수 있어야 한다. 내시경은 광학 구성상 측정 프로브 부분이 유연성을 가지는 광섬유로 구성되어야 하는데, 일반적인 광섬유의 경우에는 이미지 전송이 불가능하다. 단일 모드 광섬유 (single mode optical fiber) 및 다중 모드 광섬유 (multi-mode optical fiber)를 통해 이미지를 전송하는 연구가 진행되고 있으나, 아직까지 가시적인 성과를 내지 못 하는 상황이며, 이를 통해 이미지 전송을 구현하는 시스템 구성에는 한계를 가지고 있다.

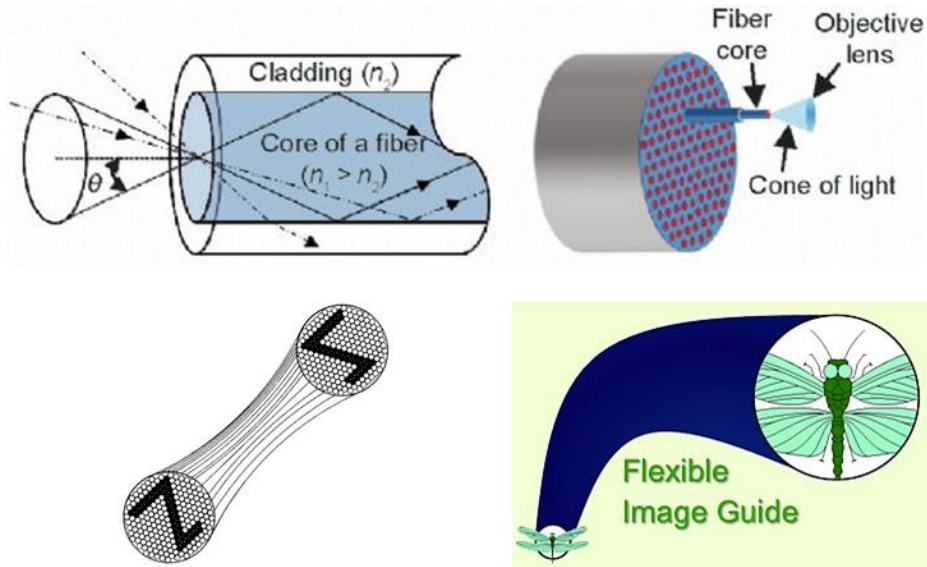


그림 21. 이미징 광섬유의 원리 및 구조

일반적으로 광섬유의 구조는 중앙에 굴절률이 높은 코어 (core)를 중심으로 주변에 굴절률이 낮은 클래딩 (cladding)이 감싸고 있으며, 외부의 충격으로부터 보호하기 위

해 피복층 (protective sheath)이 있다. 이때 단일 모드 광섬유는 비록 영상을 전송할 수 없지만 특정 강도를 가진 광도를 전달할 수 있다. 그래서 이러한 단일 모드 광섬유들을 이용하여 구성된 광섬유 다발의 경우에는 그림 21과 같이 각 단일 모드 광섬유의 광도 전달로부터 이미지 전송이 가능해지며, 이러한 광섬유 다발을 이미징 광섬유 (imaging optical fiber)라고 한다 [29]. 이때, 이미징 광섬유에서 각 단일 모드 광섬유들은 픽셀로 정의되고, 영상을 표현하는 최소 단위가 된다. 그래서 이러한 단일 모드 광섬유가 여러 개 인접해서 모이면 그 수만큼 픽셀 수가 증가하고 분해능이 높아지는 특징을 가진다.

일반적인 연성 내시경의 구조는 그림 22와 같이 측정 대상을 결상하기 위한 대물렌즈 부, 조명 부, 이미징 전송부로 나누어진다. 내시경의 끝부분에 구성된 대물렌즈 부는 측정 대상의 이미지를 이미징 광섬유에 결상하기 위한 용도로 설계되며, 용도에 따라 프리즘 삽입 등이 이루어진다. 조명 부는 이미징 전송을 위한 광섬유와 경로를 달리하여 내시경 광섬유의 외곽 부분이나 또 다른 경로의 광섬유를 통해 측정 대상에 빛을 전달한다. 한편, 이미징 광섬유는 그림 22와 같이 광섬유의 끝단에서 또 다른 끝단으로 이미지를 전송할 수 있도록 구성되며, 대물렌즈 부에 의해 결상된 이미지는 이미징 광섬유를 통해 이미지 획득을 위한 카메라로 전달된다. 이때, 조명부와 이미징 전송부에 해당하는 광섬유는 각각 별도로 구성되기 때문에 전체적인 내시경 측정 프로브의 직경이 커지게 된다.

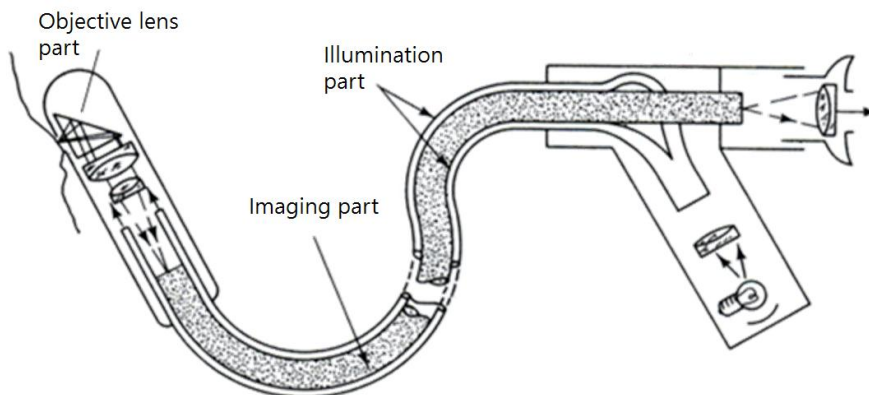


그림 22. 연성 내시경의 구조

제3절 연속 주사형 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경

본 논문에서 제안하는 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경은 내시경 광학계와 3차원 측정을 위한 연속 주사형 패턴 조사 현미경이 결합하여 그림 23과 같이 구성되며 전체적인 광학 구성은 각각 연속 주사형 패턴 조사 현미경 (CSSIM)과 내시경 측정 프로브 (Endoscopy probe)로 구분된다.

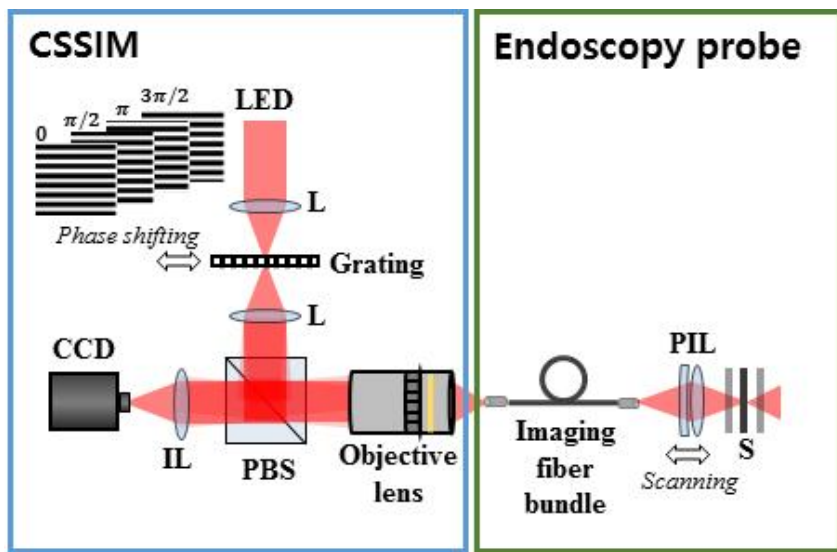


그림 23. 연속 주사형 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경 광학 구성; L, lens; PBS, polarizing beam splitter; S, specimen; IL, imaging lens; PIL, probe imaging lens

그림 23에서 알 수 있듯이, 광원으로는 스펙클이나 회절과 같은 coherent noise를 최소화하기 위해 비교적 넓은 파장 분포를 가지는 LED를 사용하며, LED의 광은 렌즈를 이용하여 패턴 조명 형성을 위한 격자에 입사한다. 격자를 통해 형성된 패턴 조명광은 편광 광 분할기 (PBS)에서 반사되어 대물렌즈를 통해 이미징 광섬유에 조사되며, 공간적 패턴은 이미징 광섬유 및 측정 프로브 이미징 렌즈 (PIL)를 이용하여 측정 대상의 표면에 조사된다. 이때, 측정 대상에서 반사된 광은 다시 이미징 광섬유를 통해 PBS로

되돌아오며, 결상 광학계 (IL)를 통해 CCD 카메라의 촬상면에서 검출된다.

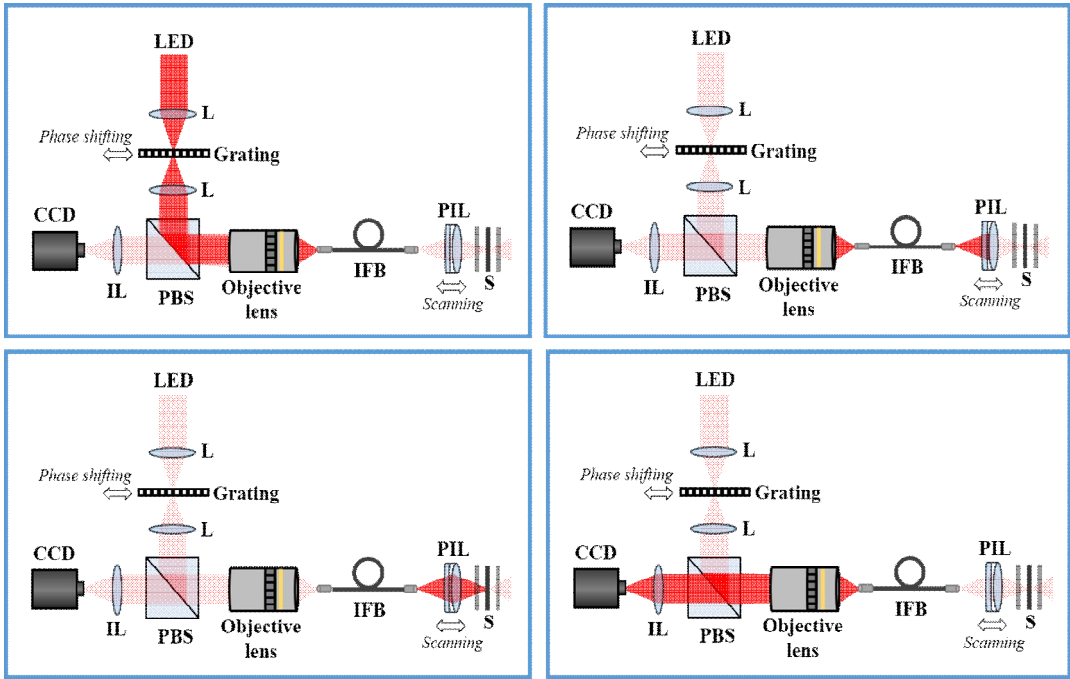


그림 24. 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경의 공액 관계

이 경우, 제안하는 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경에서는 그림 23과 같은 전체 5개의 공액 (conjugate) 이미지 평면을 갖는다. 먼저 광원에서 패턴 격자 표면과 대물 렌즈를 통과하여 이미징 광섬유 번들 근부가 공액 관계에 놓이게 되며, 이미징 광섬유의 근부와 원부 사이, 원부와 측정 시편의 표면 역시 공액 관계이다. 마지막으로 이러한 공액 관계에 있는 면들은 CCD 카메라의 촬상면과 공액 관계에 놓여 있다. 그래서 측정 대상의 표면이 최적의 초점 위치에 있을 때, 조명의 공간적 패턴은 시편에 선명하게 투영될 수 있고, 전체적인 공액 관계를 통해 CCD 카메라에서 선명하게 관찰된다. 반면, 시편이 초점 위치로부터 광축 방향으로 이동하게 되면, 패턴 및 시편 이미지 모두 흐려지는 현상이 발생한다. 결국, 제안하는 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경에서는 이러한 원리를 이용하여 카메라의 각 픽셀에서 검출되는 공간 조명 패턴의 가

장 높은 가시도를 검출하여 측정 대상의 3차원 형상을 복원할 수 있다.

이때, 그림 24에서의 PBS는 이미징 광섬유의 근부에서 반사되는 공간 조명 광을 제거하기 위한 용도로 도입되었다. 이미징 광섬유에 광을 조사하는 경우, 정렬 등의 실험 조건에 따라 투과 효율이 달라지기는 하나 일반적으로 투과율은 30% 이내이며, 그 이외의 광은 이미징 광섬유의 끝단에서 반사된다. 그리고 이러한 이미징 광섬유의 끝단 반사광은 결국 시편에서 반사되어 되돌아오는 광과 함께 CCD 카메라에서 검출되기 때문에, 측정 대상의 초점 위치와 상관없는 선명한 공간 패턴이 이미지에 나타난다. 이는 CSSIM 신호를 해석하면서 신호대 잡음비 (signal-to noise ratio, SNR)를 저하하는 요인으로 작용한다. 이를 방지하기 위해 PBS는 이미징 광섬유의 근부에서 반사하는 광을 편광으로 제거하는 역할을 한다. 한편, 이미징 광섬유를 통과한 광의 경우에는 이미징 광섬유의 미세한 복굴절성 (birefringence) 및 편광 회전 (polarization rotation)으로 PBS에서 모두 제거되지 않고 CCD 카메라로 전달된다. 그래서 PBS를 사용하지 않는 경우의 광학 구성에 비해 SNR을 높일 수 있다.

제3장 실험 결과 및 분석

제2장에서는 패턴 조사 현미경에 대한 원리와 이미징 광섬유 기반 내시경 프로브에 대해 설명하였다. 이를 바탕으로 제3장에서는 본 연구에서 제안한 패턴 조사 현미경을 이용한 3차원 내시경 시스템을 구성하고, 검증을 위해 다양한 시편의 3차원 형상 측정 실험을 수행하였다. 제안하는 시스템을 구성하기 전에 연속 주사형 패턴 조사 현미경 및 이미징 광섬유를 통한 영상 전송의 기초 실험을 진행한 후, 패턴 조사 현미경을 이용한 3차원 내시경 시스템의 다양한 실험 내용에 관해 설명한다.

- 기초 실험
 - 연속 주사형 패턴 조사 현미경
 - 이미징 광섬유 기반 내시경 프로브

- 패턴 조사 현미경을 이용한 3차원 내시경 실험
 - 연속 주사형 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경 구성
 - 연속 주사형 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경 실험 및 결과
 - 초소형 내시경 프로브 실험 및 결과
 - 이중 프로브 실험 및 결과

제1절 기초 실험

1. 연속 주사형 패턴 조사 현미경

그림 25는 연속 주사형 패턴 조사 현미경 시스템의 (a) 광학 구성과 (b) 실제 광학 구성 사진을 보여준다.

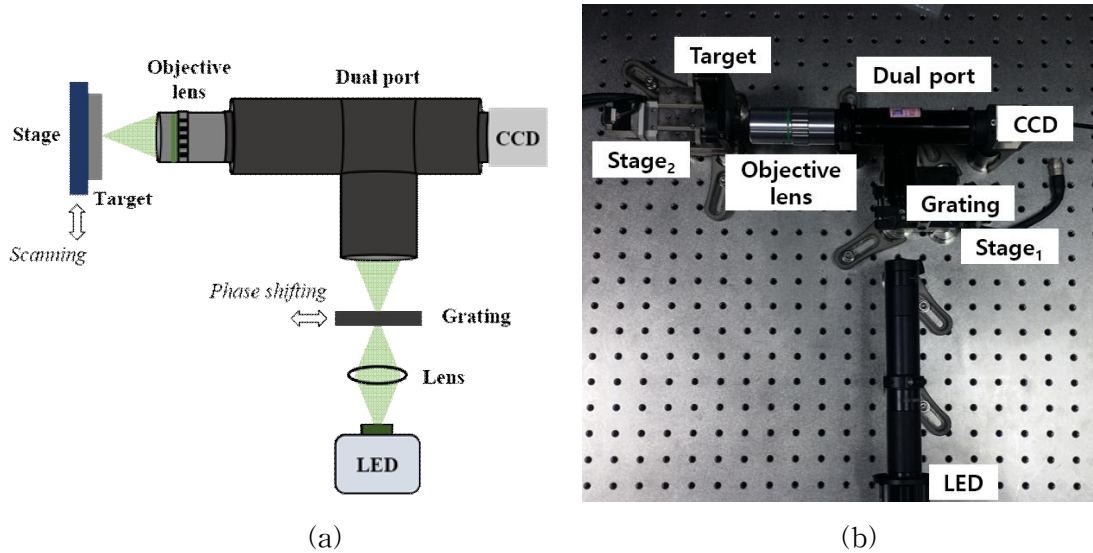


그림 25. 연속 주사형 패턴 조사 현미경의 (a) 광학 구성, (b) 실제 구성

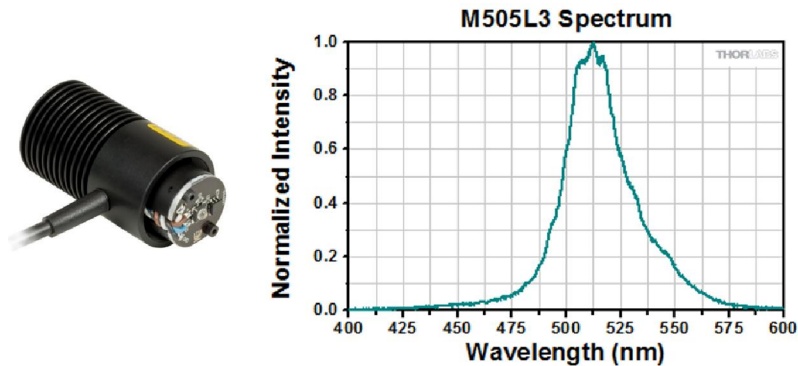


그림 26. LED 광원과 스펙트럼

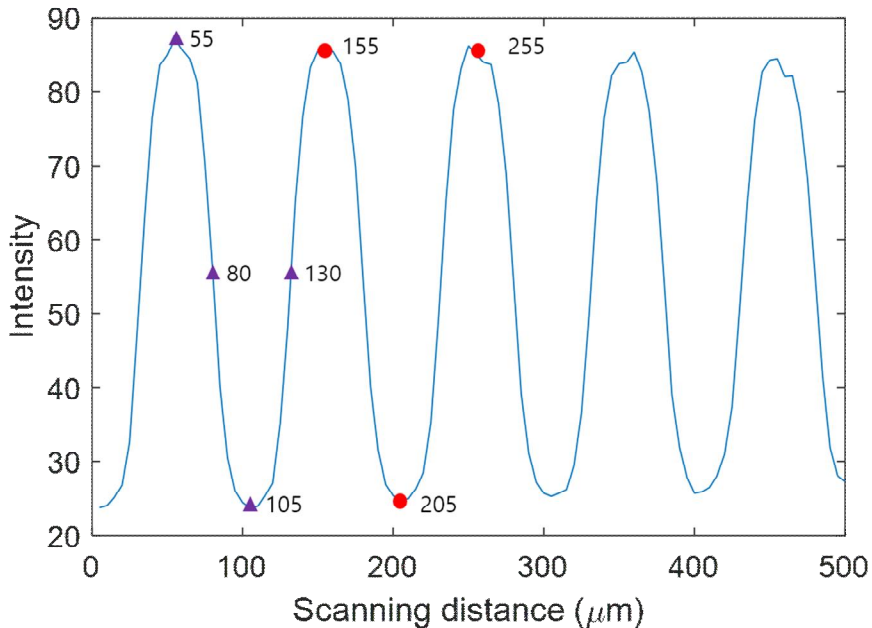


그림 27. 횡방향 구동을 통한 CCD 카메라의 임의의 픽셀의 사인과 패턴 확인

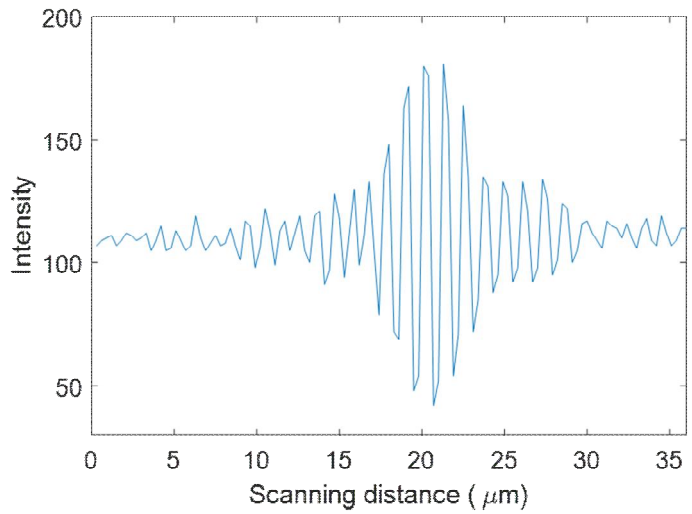
실험에 사용된 광원으로는 그림 26과 같이 Thorlabs 사의 M505L3 제품으로 중심 파장 505 nm, 반치폭 (full width at half maximum, FWHM) 30 nm를 갖는 LED (light emitting diode)를 이용하였다. 공간적인 사인과 패턴을 생성하기 위한 장치로는 pitch가 100 μm 인 Ronchi grating (or Ronchi ruling)을 사용하였으며, CCD 카메라의 임의의 한 픽셀에서 횡방향의 구동기를 통해 그림 27과 같이 광강도 분포가 사인과 형태로 나타남을 확인하였다. 측정 시편의 종축 방향 구동기로는 50 nm의 분해능을 가지는 Suruga Seiki 사의 X축 리니어 볼식 스테이지인 XCV630-G-C 제품을 사용하였으며, 패턴 조사 및 이미지 획득을 위해 Dual port 광학계 (InfiniTube Standard dual-port)를 이용하였다. Dual port 광학계에서는 광원의 빛이 대물렌즈 (objective lens)를 통해 시편에 조사된 후, 반사되어 CCD 카메라에 측정 시편의 이미지가 결상되도록 구성되어 있다. 또한, 대물렌즈로는 Mitutoyo 사의 M Plan Apo series의 5X, 10X, 20X 렌즈들을 사용하였으며, CCD 카메라는 Thorlab 사의 (1024 x 1280) 픽셀을 가지는 DCU224M (픽셀 크기 : 4.65 μm)를 이용하였다. 먼저, 연속 주사형 패턴 조사 현미경

을 검증하기 위해 20X 대물렌즈를 이용하여 실험을 수행하였다. 그림 25(b)의 Stage₁을 통해 패턴의 위상 천이를 진행하였으며, 그림 27에서 알 수 있듯이 100 μm 의 pitch에 대해 25 μm 간격으로 구동하여 4-step 위상 천이 알고리즘을 적용하였다. 또한, 측정 시편의 종축 구동을 위한 Stage₂는 Stage₁과 동기화하여 구동됨으로써, CCD 카메라의 각 픽셀에서 CSSIM 신호를 획득할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 측정 시편으로는 평면거울 (plane mirror), 마이크로 렌즈 어레이 (micro-lens array), 거친 표면 시편 (rough surface specimen) 등 다양한 종류의 표면을 가진 시편을 준비하였으며, 각각에 대한 3차원 형상을 측정하고 결과를 분석하여 연속 주사형 패턴 조사 현미경의 성능을 검증하였다.

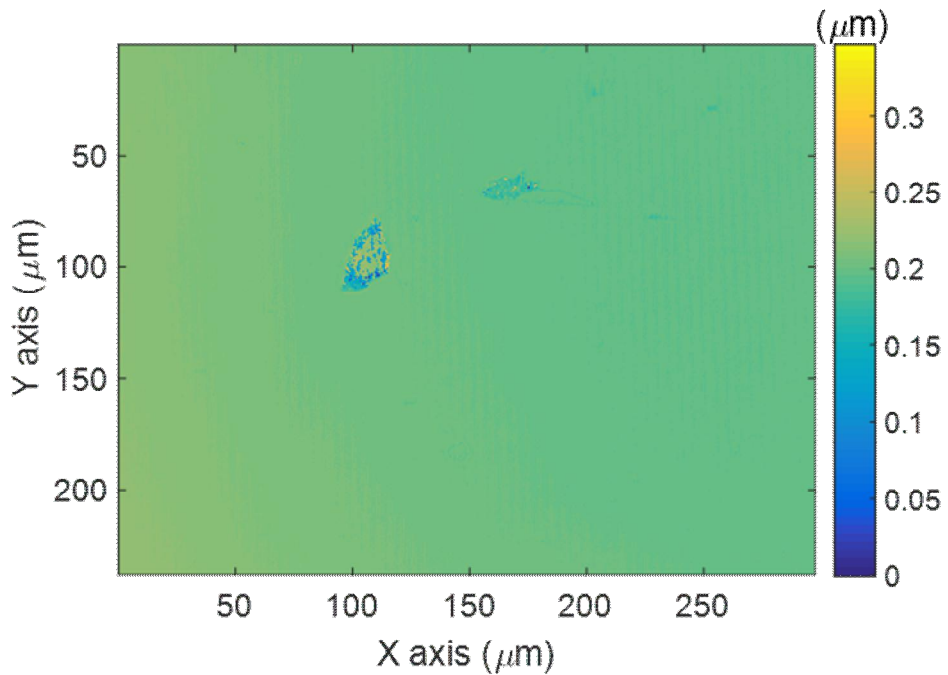
그림 28은 평면거울에 대한 실험 결과를 보여준다. 그림 28(a)는 실제 측정한 평면거울인 Thorlabs 사의 PF10-03-P01 제품으로, Surface flatness가 $\lambda/10@633\text{nm}$ 인 silver mirror이다. 이를 연속 주사형 패턴 조사 현미경으로 측정한 결과, 그림 28(b)와 같이 임의의 한 점에서 CSSIM 신호로 가시도 변화 및 변조 신호를 확인할 수 있었다. 이때, 측정 시편의 종축 방향 주사는 300 nm 간격으로 총 36 μm 를 스캔하였으며, CSSIM 신호의 길이는 반치폭 기준으로 6.3 μm 였다. 또한, 획득된 CSSIM 신호는 앞서 이론에서 설명한 것과 같이 백색광 주사 간섭계의 간섭 신호와 유사한 형태로 획득되었음을 확인하였으나, 실험 중에 사용한 스테이지의 구동 오차로 인해 최적의 초점 위치를 기준으로 가시도 변화가 다소 좌우 비대칭임을 알 수 있었다. 하지만, 획득된 신호는 충분히 푸리에 영역 분석법을 이용하여 분석할 수 있고, 그림 19의 과정으로 각 픽셀별로 푸리에 변환 후, 주파수 대역 통과 필터를 적용하여 높이 값을 계산하여 3차원 형상을 복원한 결과, 그림 28(c)와 같이 평면거울의 형상을 획득하였다. 측정된 형상의 표면은 대략 1.4 μm 의 PV (peak to valley) 값과 0.19 μm 의 Sa (arithmetical mean height of the surface) 값을 가지고 있는 것을 확인하였으며, 이는 제조사가 제공하는 사양보다 다소 큰 값이다. 측정 결과에서 이러한 오차가 발생한 요인으로는 구동 중에 발생하는 광원의 불안정과 시스템에서 발생하는 수차에 의한 요인으로 분석된다.



(a)



(b)



(c)

그림 28. (a) 평면거울의 (b) 임의의 한 점에 대한 CSSIM 신호와 이를 분석한 (c) 3차원 형상 측정 결과

한편, 그림 29는 마이크로 렌즈 어레이에 대한 실험 결과를 나타내며, 측정 시편은 그림 29(a)와 같은 Thorlab 사의 MLA150-7AR-M 제품을 이용하였다. 제조사의 사양에서 곡률 (r)은 3.063 mm이며, lens pitch (p)은 150 μm 이다. 그림 29(b)는 연속 주사형 패턴 조사 현미경으로 임의의 한 점에서 획득한 CSSIM 신호를 보여주고 있으며, 이때 실험은 300 nm 간격으로 총 30 μm 거리만큼 구동하며 진행되었다. 획득된 CSSIM 신호의 길이는 6 μm 였으며, 이를 푸리에 영역 분석법으로 분석한 결과 그림 29(c)와 같이 3차원 형상을 복원할 수 있었다. 측정 결과 마이크로 렌즈 어레이의 불룩한 면에 대한 높이는 0.93 μm 로 계산되었으며, 제조사가 제공한 불룩한 면에 대한 사양 s 에 해당하는 높이 값인 0.87 μm 와 비교하였을 때, 오차 범위에 있는 것을 확인하였다. 마지막으로 그림 30은 거친 표면 시편에 대한 실험 결과를 나타낸다. 평면거울 및 마이크로 렌즈 어레이의 경우에는 표면이 매우 매끄럽기 때문에 3차원 형상 측정이 비교적 수월하나, 일반적인 측정 시편의 경우에는 표면의 거칠기가 존재하기 때문에 형상 측정에 한계를 갖는다. 이에 대해 본 연구에서는 연속 주사형 패턴 조사 현미경을 이용하여 이러한 거친 표면에 대한 3차원 형상 측정의 가능성을 확인할 필요가 있으며 이를 위해 그림 30(a)와 같이 Mitutoyo 사 제품인 BM1-47D-2 세트의 게이지 블록 (gauge block)의 글자가 새겨진 거친 표면을 측정하였다. 이때, 시편은 300 nm 간격으로 총 30 μm 거리만큼 구동하여 측정을 수행하였으며, 그 결과 임의의 한 점에서 획득한 CSSIM 신호는 그림 30(b)와 같다. CSSIM 신호의 길이는 7.2 μm 였으며, 푸리에 영역 분석으로 분석한 결과 그림 30(c)와 같이 거친 표면에서도 3차원 형상을 획득할 수 있음을 확인하였다.

3개의 서로 다른 측정 시편에 대해 수행한 연속 주사형 패턴 조사 현미경의 기초 실험을 통해, 연속 주사형 패턴 조사 현미경이 3차원 형상 측정이 가능함과 동시에 정량적인 측정이 가능하므로 3차원 내시경의 측정 원리로 활용할 수 있음을 확인하였다. 또한, 평면거울의 측정 결과를 바탕으로 수 μm 의 정밀도로 3차원 형상이 측정 가능함을 알 수 있었으며, 동시에 측정 중에 발생하는 광원의 안정성 및 구성된 결상 광학계의 수차들로 인하여 측정 오차가 발생할 수 있음을 확인하였다. 이러한 측정 오차는 보다 안정적인 광원과 수차가 보정된 광학계 사용으로 최소화할 수 있으며, 현실적으로는 평면거울의 측정 결과를 보상함으로써, 오차를 제거하는 방법이 가능하다.

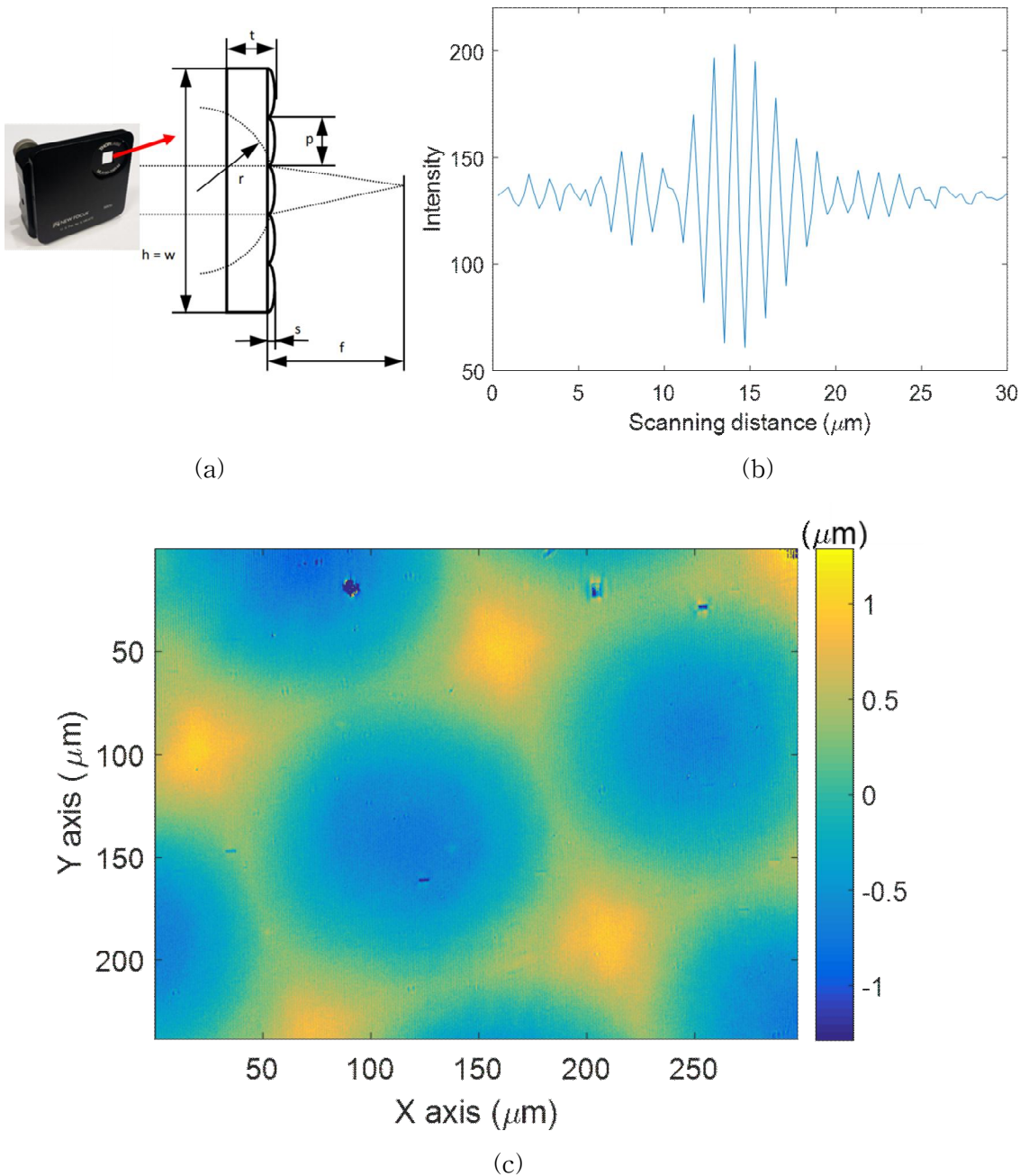
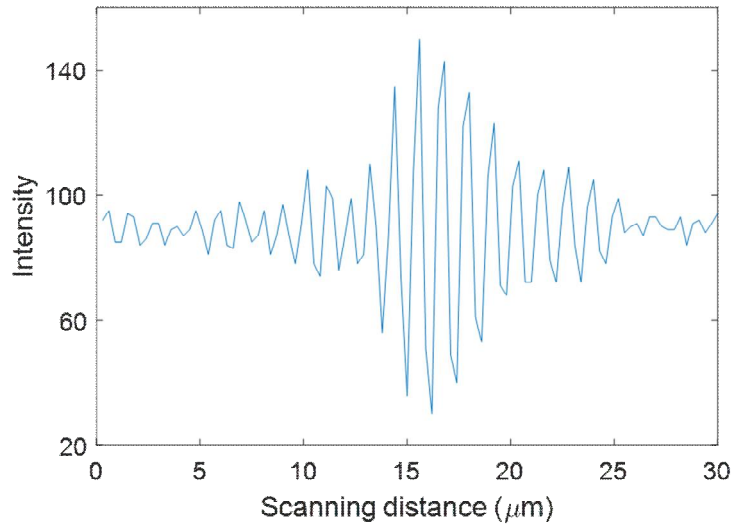


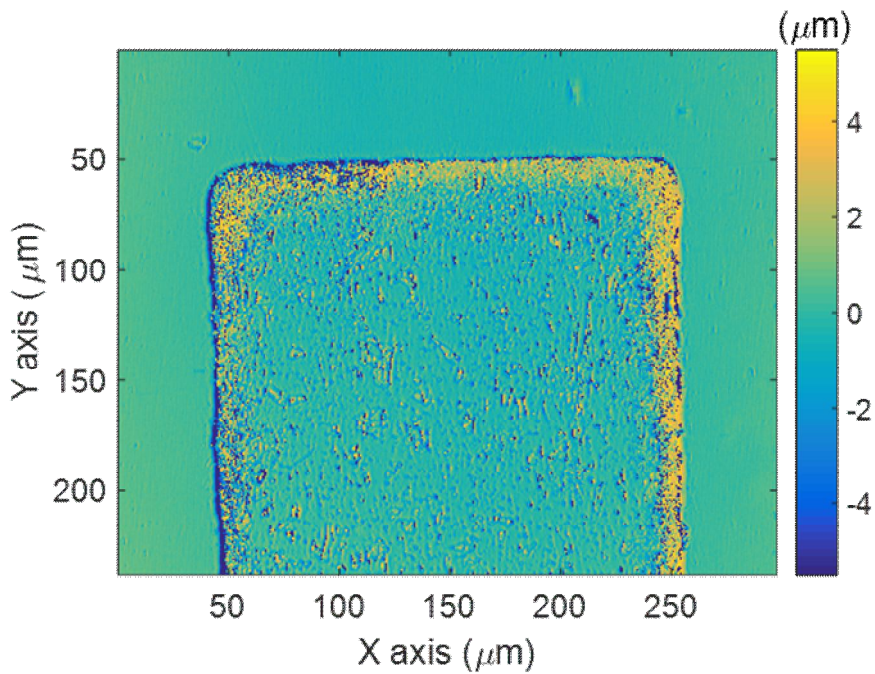
그림 29. (a) 마이크로 렌즈 어레이의 (b) 임의의 한 점에 대한 CSSIM 신호와 이를 분석한 (c) 3차원 형상 측정 결과



(a)



(b)



(c)

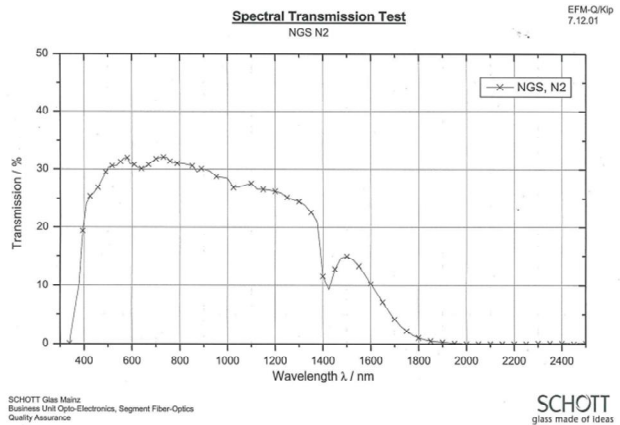
그림 30. (a) 거친 표면 시편의 (b) 임의의 한 점에 대한 CSSIM 신호와 이를 분석한
 (c) 3차원 형상 측정 결과

2. 이미징 광섬유 기반 내시경 프로브

두 번째 기초 실험으로 이미징 광섬유의 영상 전송 실험을 수행하였다. 그림 31(a)는 본 연구에서 사용한 내시경 프로브 부분의 이미징 광섬유 번들 (imaging fiber bundle, IFB)로 Schott 사의 #1533446 제품을 보여준다. 유효 면적 (quality area diameter)은 0.8 mm로, 이미징 광섬유 번들은 전체 13,500개의 광섬유로 이루어졌으며, 각 광섬유 크기 (pixel size)는 $8.2 \mu\text{m}$ 이다. 또한, 그림 31(b)는 제조사에서 제공하는 투과율 정보를 나타내며, 이를 살펴보면 660 nm 대역의 투과 효율이 약 30%이다. 이를 실험적으로 확인하기 위해, 그림 32와 같은 광학 구성으로 이미징 광섬유 번들의 투과 효율을 측정하였으며, 측정 결과 대략 33%로 제조사의 사양과 거의 유사한 투과 효율을 가짐을 실험적으로 확인하였다. 이때, 실험은 그림 32와 같이 Thorlab 사의 S1FC660 광원인 660 nm 대역의 Single Mode Fiber-Coupled Laser Sources와 렌즈, 이미징 광섬유 번들로 진행하였으며, 투과 효율을 계산하기 위해 그림 32에서 나타난 각 화살표의 지점에서 광강도를 Thorlabs 사의 PM100D인 Digital optical power and energy meter로 측정하여 계산하였다.



(a)



(b)

그림 31. (a) 이미징 광섬유 번들과 (b) 투과율 데이터시트

- Optical source : Laser Diode (660 nm)
- Lens : $f = 50 \text{ mm}, 30 \text{ mm}$

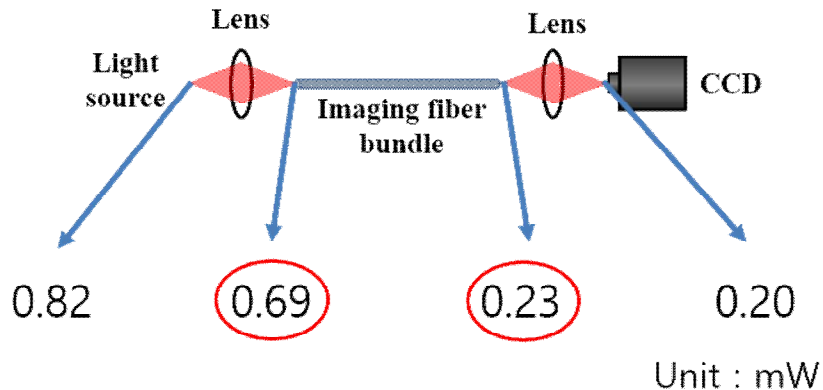
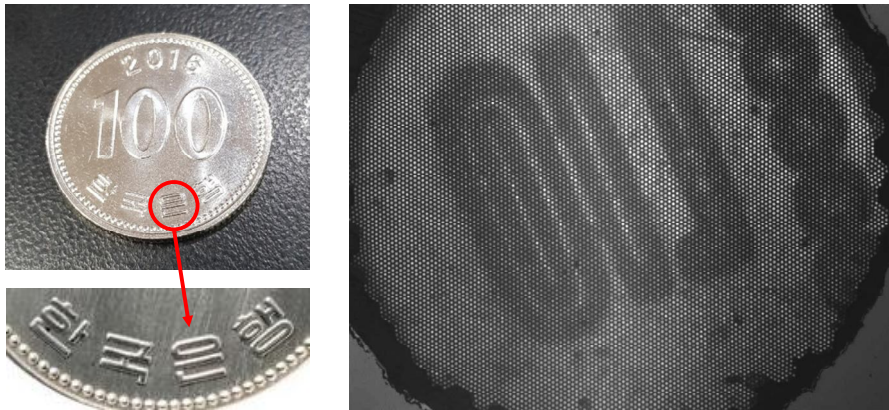


그림 32. 이미징 광섬유 번들의 투과 효율 실험 및 결과

한편, 그림 33은 5X 대물렌즈를 이용하여 4 mm의 FOV (field of view, FOV)에서 여러 시편의 이미지를 이미징 광섬유 번들을 통해 CCD 카메라로 확인한 결과를 나타낸다. 그림 33을 살펴보면 비록 광섬유 다발의 구조가 이미지에 별집형태로 나타나지만, 시편의 모습이 이미징 광섬유 번들을 통해 CCD 카메라로 잘 전송되고 있음을 확인할 수 있었다. 그림 33(a)는 한국동전의 100원의 뒷면에 한국은행 글자의 ‘은’에 해당하는 이미지이며, 그림 33(b)는 게이지 블록의 제품번호의 일부분의 이미지를 보여준다. 이와 더불어, 본 연구에서는 패턴 조사 현미경의 원리로 이미징 광섬유 번들을 이용하여 3차원 내시경을 구성하기 때문에, 광원부의 공간 패턴이 이미징 광섬유 번들을 통해 전송이 가능한 동시에 CCD 카메라에서는 이러한 패턴과 함께 시편의 모습이 획득되어야 한다. 이를 확인한 결과, 그림 33과 34와 같이 시편의 이미지와 공간 패턴 모두 성공적으로 전송되고 있음을 알 수 있었으며, 이를 통해 단일 이미징 광섬유 번들을 이용하여 내시경 프로브의 광원과 영상 경로를 동축으로 구성할 수 있음을 확인하였다.



(a)



(b)

그림 33. 이미징 광섬유 번들을 통해 본 시편 이미지 (a) 동전, (b) 게이지 블록

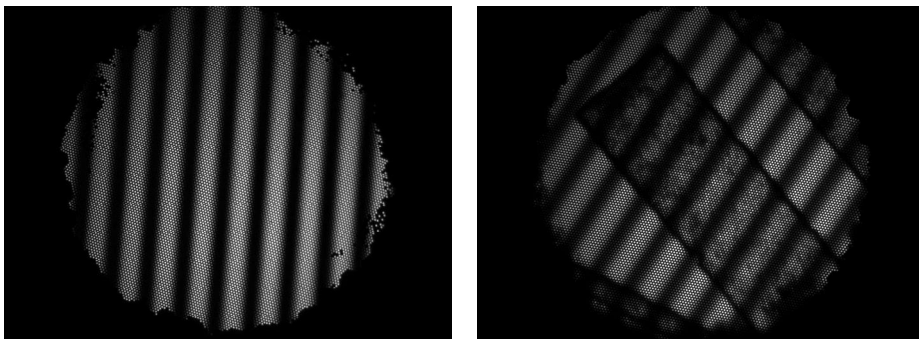


그림 34. 공간 패턴과 시편의 이미지가 동시에 전송된 결과

제2절 패턴 조사 현미경을 이용한 3차원 내시경

1. 연속 주사형 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경 구성

연속 주사형 패턴 조사 현미경과 이미징 광섬유 기반 내시경 프로브의 기초 실험을 진행한 이후, 본 논문에서 제안한 3차원 내시경의 성능을 검증하기 위해 그림 35와 같이 연속 주사형 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경을 구성하였다. 본 실험에서는 pitch가 $200\ \mu\text{m}$ 인 Ronchi grating과 5X 대물렌즈, 분해능이 (768 x 1024) (픽셀 크기 : $4.65\ \mu\text{m}$)인 CCD 카메라를 사용하였다.

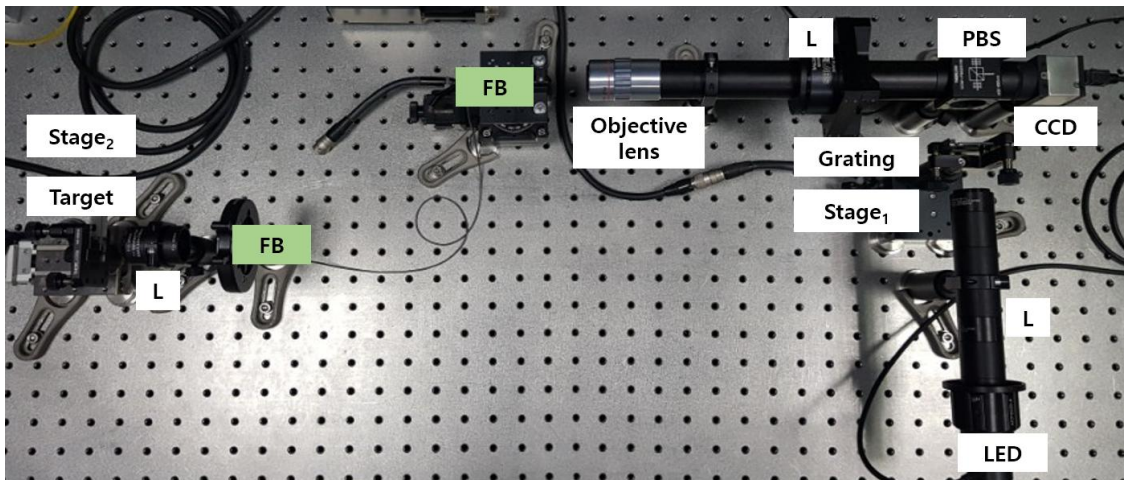


그림 35. 연속 주사형 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경 광학 구성

실험에 앞서 실제로 연속 주사형 패턴 조사 현미경에서 시편 측정 시, 위상 천이용 구동기인 Stage₁과 시편의 종축 방향 구동기인 Stage₂를 동기화하여 CCD 카메라에서 획득한 이미지에 대한 가시도 변화를 그림 36과 같이 확인하여 구성된 3차원 내시경의 기본적인 성능을 확인하였다. 이때, 시편의 3차원 형상을 측정하기 위해서는 획득된 이미지의 가시도의 정점을 구하는 것이 필수적이므로, 실험 과정에서 가시도 획득에 대한 가능 여부가 매우 중요하다. 하지만 언급한 이미징 광섬유의 근부에서 반사되는 공간 조명 광으로 인하여 CCD 카메라에서 측정되는 이미지간의 가시도 변화는 거의 차

이가 없음이 확인되었고, 이를 개선하기 위해 앞서 이론에서 설명한 바와 같이, 편광 광 분할기 및 편광 소자를 사용하여 근부의 반사광을 제거하였다.

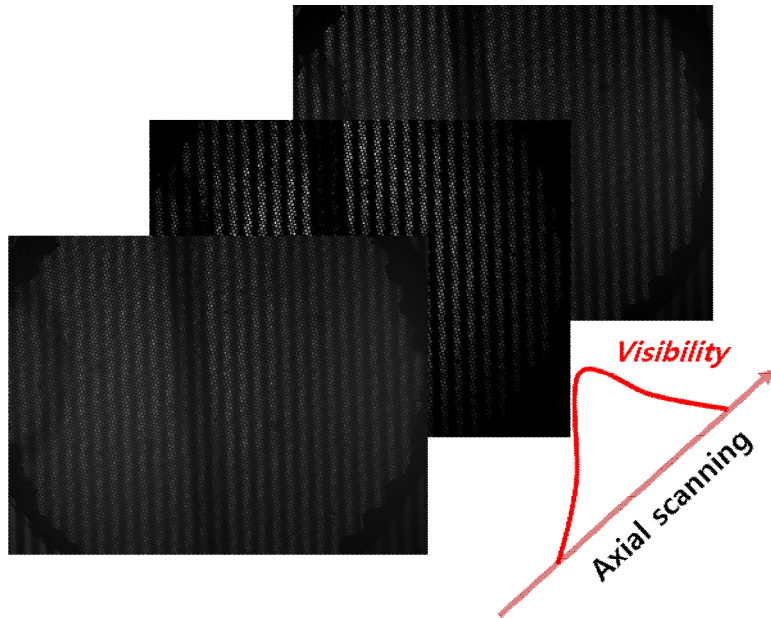


그림 36. 실제 CCD 카메라에서 획득되는 이미지

2. 연속 주사형 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경 실험 및 결과

제안하는 3차원 내시경 시스템을 검증하기 위해 그림 35의 광학 구성으로 여러 길이를 가지는 게이지 블록들로 제작한 높이 단차 시편과 동전의 형상을 측정하였다. 먼저 단차 시편은 각각 1.1 mm와 1.6 mm의 길이를 가지는 게이지 블록을 이용하여 500 μm 의 높이를 가지도록 제작하였다. 측정 영역은 그림 37(a)에 표시한 직경 4 mm를 가지는 빨간색 원 부분이었으며, 측정 시편을 12.5 μm 의 간격으로 전체 2.5 mm의 거리만큼 구동하면서 실험한 결과, 그림 37(b)와 같은 CSSIM 신호를 획득하였다. 이때, 획득된 CSSIM 신호는 연속 주사형 패턴 조사 현미경의 기초 실험과 다소 차이를 보이며 이는 완벽하게 제거되지 못한 이미징 광섬유 근부의 반사광 영향으로 판단된다. 비록 이미징 광섬유 번들의 근부에서 발생하는 공간 조명 광을 제거하기 위해 하드웨

여 상에서는 PBS와 편광 소자를 이용하여 어느 정도 반사광을 제거하였으나, 그림 37(b)와 같이 여전히 반사광이 남아 있는 문제가 발생하였으며, 이러한 문제를 해결하고자 본 연구에서는 CSSIM 신호를 분석하기에 앞서, 초점이 벗어난 지점에서 획득한 위상 천이된 4장의 이미지를 전체 획득한 이미지에서 보상해줌으로써, 소프트웨어적으로 제거하는 방법을 통한 추가적인 개선을 진행하였다.

또한, 이미징 광섬유와 프로브단의 대물렌즈 사용으로 인해 CSSIM 신호의 길이가 다소 늘어진 원인으로 측정 시편의 구동 거리 역시 길어졌다. 사실상, 연속 주사형 패턴 조사 현미경에서 획득되는 CSSIM 신호는 패턴의 위상 천이와 시편의 종축 방향 구동을 통해 시편에 대한 최적의 초점 위치 근처에서 획득된다. 이러한 영역은 일반적인 현미경 광학계의 초점심도 (depth of focus, DOF)에 해당하며, 초점심도는 렌즈의 수치 구경 (numerical aperture, NA)에 결정된다. 이를 수식적으로 나타내면,

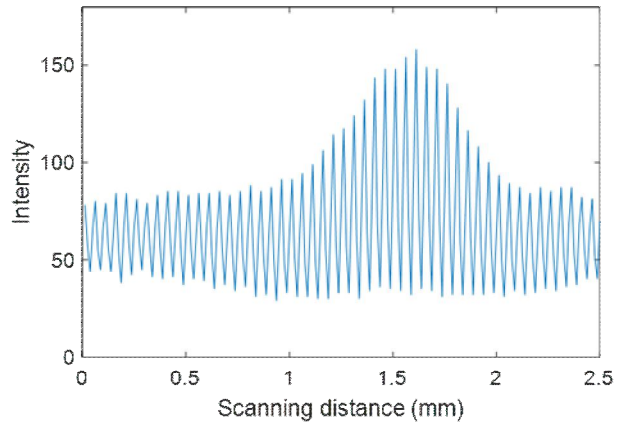
$$DOF = \pm \lambda / 2NA^2 \quad (17)$$

와 같으며, 여기서 λ 는 광원의 파장을 의미한다. 식 (17)을 보면, 사용하는 렌즈의 수치 구경이 클수록 초점심도의 값이 작아지게 되므로, CSSIM 신호의 길이가 짧아진다. 이를 바탕으로 살펴보면, 기초 실험에서는 비교적 큰 수치 구경을 가지는 대물렌즈의 사용으로 비교적 짧은 CSSIM 신호의 획득이 가능하였으나, 3차원 내시경의 경우에는 현미경 대물렌즈 외에 이미징 광섬유 번들과 이미징 광섬유 번들의 원부에서 사용한 결상 렌즈로 인하여 전체 프로브 시스템의 수치 구경이 현저히 낮아지는 결과가 발생하였고, 이로 인해 기초 실험에서 구성한 광학계와는 달리 다소 긴 길이의 CSSIM 신호 획득 및 구동량의 차이가 발생하였다.

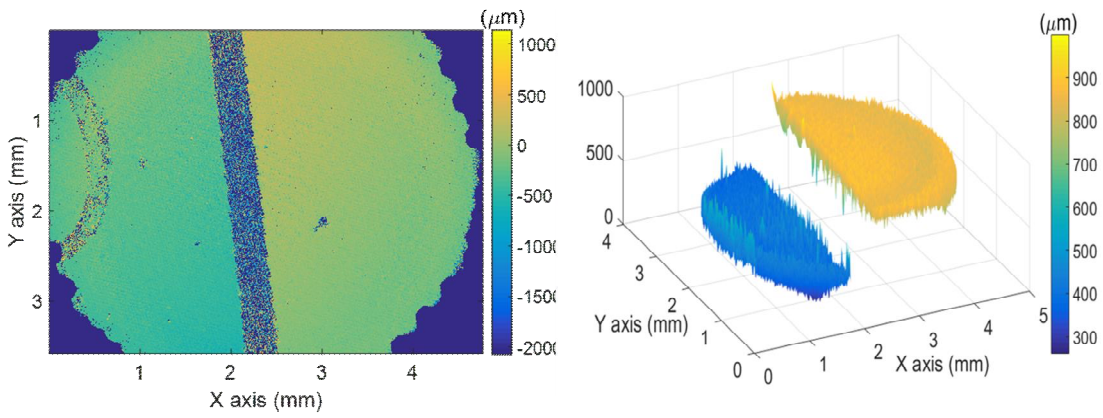
이후, CSSIM 신호는 그림 17과 같이 각 픽셀별로 푸리에 변환과 역푸리에 변환 과정을 거치면서, 각 픽셀별 높이 값은 식 (14)를 통해 계산되었으며, 그림 37(c)와 같이 측정 시편의 3차원 형상이 복원됨을 확인하였다. 그 결과, 서로 다른 게이지 블록의 두 영역의 높이 차이는 기준 값 $500 \mu\text{m} \pm 0.9 \mu\text{m}$ 에서 $501 \mu\text{m}$ 로 측정되었으며, 15번 반복 측정으로 인해 높이 맵의 평균값에 대한 반복성은 $16.1 \mu\text{m}$ 로 계산되었다.



(a)



(b)



(c)

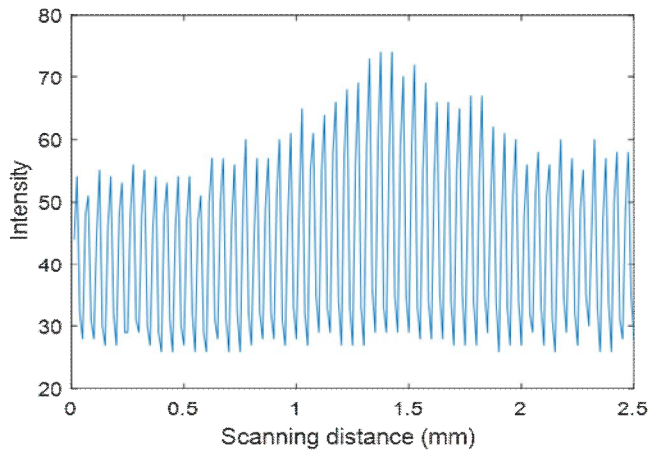
그림 37. (a) $500 \mu\text{m}$ 높이 차이를 가지는 게이지 블록의 (b) 임의의 한 점에서의 CSSIM 신호와 (c) 3차원 형상 측정 결과

두 번째로는 그림 38(a)와 같이 100원 동전 뒷면의 ‘한국은행’ 글자에서 빨간색 원 부분으로 표시한 ‘한’ 글자 부분을 측정하였다. 실험은 단차 시편 실험과 동일하게 $12.5 \mu\text{m}$ 간격으로 전체 2.5 mm의 구동 조건으로 진행되었으며, 그림 38(b)와 같이 CSSIM 신호를 획득하였다. 이때, 단차 시편 측정 실험과 달리 CSSIM 신호의 가시도 차이가 비교적 작은 이유는 동전의 표면 상태에 따른 반사도가 단차 시편에 비해 낮기 때문

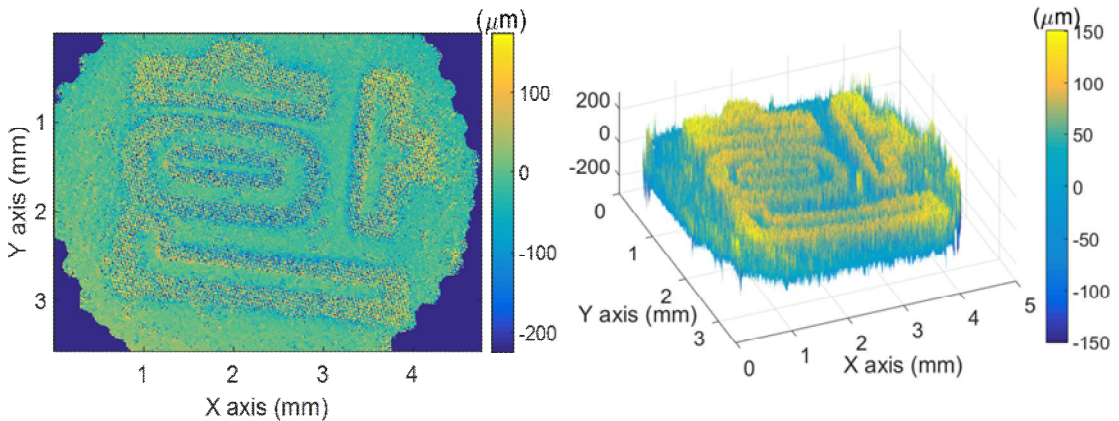
으로 판단된다. 하지만 그림 38(b)에서 알 수 있듯이, 분석에 있어 충분한 가시도 차이가 있기 때문에, 앞서와 동일한 분석 방법으로 3차원 형상을 복원하여 그림 38(c)와 같은 측정 결과를 얻을 수 있었다. 특히, 양각으로 되어 있는 글자 부분은 매끄럽지 않은 형태로 보이는데 이 역시 표면의 상태로 인해 반사되어 들어오는 빛이 난반사되어 매끄럽게 복원되지 않는 것으로 생각된다.



(a)



(b)

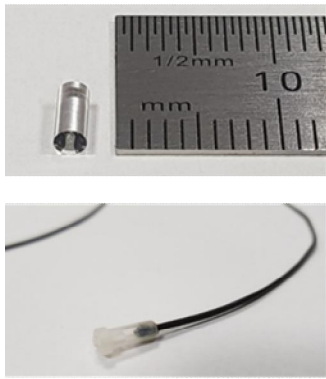


(c)

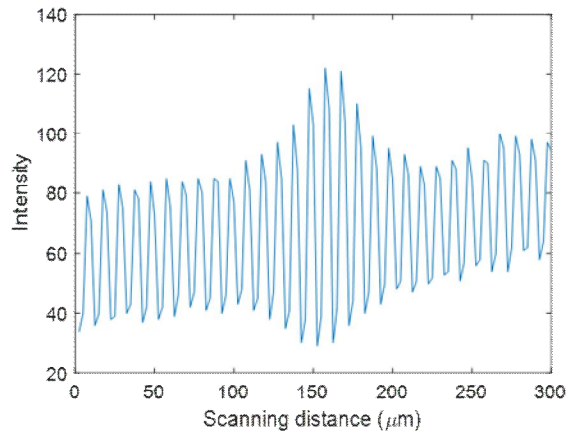
그림 38. (a) 동전 한국은행 글자에서 ‘한’의 (b) 임의의 한 점에서의 CSSIM 신호와 (c) 3차원 형상 측정 결과

3. 초소형 내시경 프로브 실험 및 결과

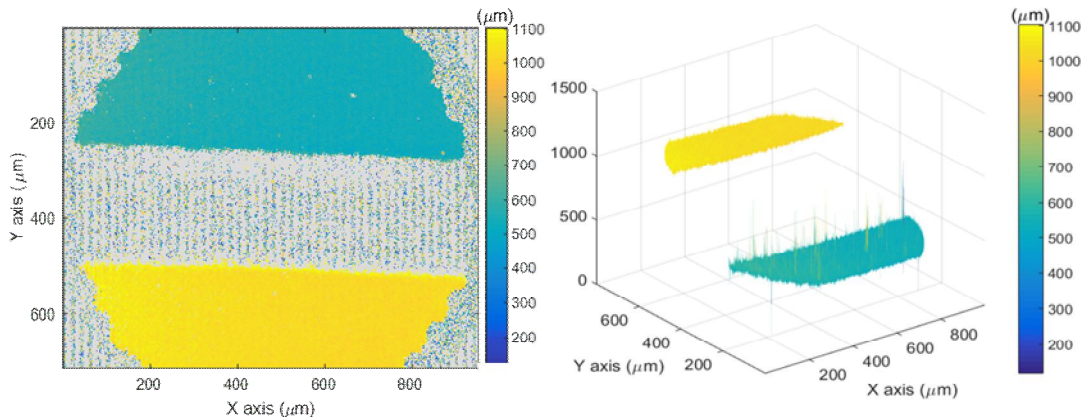
앞서 실험을 통해 본 연구에서 제안하는 연속 주사형 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경의 기본적인 성능을 확인하였다. 그러나 이는 성능 검증을 위한 실험으로, 제안하는 3차원 현미경의 실용성을 보다 확인하기 위해서는 초소형 측정 프로브에 대한 실험이 수반되어야 한다. 먼저, 내시경 프로브의 소형화를 위해 기본적으로 기존 내시경의 광원 경로와 영상 경로로 나뉜 구조를 단일 이미징 광섬유 번들의 사용으로 광원과 영상 경로를 일치시킴으로써 소형화를 이루었다. 또한, 그림 39(a)와 같은 GRIN (gradient index) 기반 초소형 내시경 프로브를 제작하였다. 사용한 GRIN 렌즈는 GrinTech 사의 GT-IFRL-200-010-50-CC 제품으로, 직경 2 mm, 작동 거리 (working distance) 10 mm, 렌즈 길이 5.33 mm를 가지고 있어, 본 연구에서 내시경 프로브의 소형화를 위해 사용하였다. 제작한 초소형 프로브의 성능을 검증하기 위해 3차원 형상 측정 실험을 진행하였으며, 측정 시편은 앞서 사용한 500 μm 의 높이 차이를 가지는 단차 시편을 이용하였다. 실험을 위해 측정 시편은 2.5 μm 간격으로 전체 300 μm 거리만큼 구동하였으며, CCD 카메라의 임의의 한 픽셀에서 그림 39(b)와 같은 CSSIM 신호를 확인하였다. 푸리에-역푸리에 분석방법으로 CSSIM 신호를 분석한 결과, 그림 39(c)와 같은 3차원 형상을 복원할 수 있었으며, 서로 다른 게이지 블록의 단차를 계산한 결과, 496 μm 를 얻을 수 있었다. 참고로 그림 39(c)의 오른쪽 그림은 경사가 급해서 측정이 이루어지지 않은 부분의 형상은 제거하고 단차 시편의 3차원 형상을 복원한 모습을 나타낸다. 비록, 현재 제작한 초소형 프로브로 측정할 수 있는 영역은 제한된 렌즈 이용으로 인해 1 mm에 불과하지만, 추가적인 렌즈 사용 및 설계를 통해 측정 영역을 확대할 수 있을 것으로 생각된다.



(a)



(b)



(c)

그림 39. (a) 소형화된 프로브로 측정된 (b) 임의의 한 점에 대한 CSSIM 신호, (c) 게이지 블록 측정 결과

4. 이중 프로브 실험 및 결과

마지막으로 이미징 광섬유 번들의 근부에서 반사되는 반사광을 완전히 차단하기 위해 이중 이미징 광섬유 번들 기반의 3차원 내시경 실험을 진행하였다. 이 경우, 두 개의 이미징 광섬유 번들이 각각 기존의 내시경과 같이 광원 경로와 영상 경로에 해당하기 때문에 동축 구성의 3차원 내시경의 구현이 어려우나, 편광 소자를 사용하지 않고도 높은 가시도 차이로 CSSIM 신호가 획득 가능한 장점이 있는 동시에 측정 프로브의 크기도 소형화할 수 있는 특징이 있다. 그림 40은 이중 이미징 광섬유 번들 기반 3차원 내시경의 시스템 구성을 나타낸다. 그림 40의 공간 패턴을 포함하는 빛은 편광 광 분할기 대신 광원 경로 역할을 하는 이미징 광섬유 번들 (FB1)을 지나 광 분할기를 통해 시편에 조사된다. 이후, 시편에서 반사된 빛은 다시 광 분할기를 통해 영상 경로 역할을 하는 또 다른 이미징 광섬유 번들 (FB2)로 진행하여 CCD 카메라에 결상된다. 그래서 이미징 광섬유 번들의 근부에서의 반사는 측정되는 CSSIM 신호에 영향을 미치지 않는다. 이때 광 검출부에서는 10X 대물렌즈를 이용하여 이미징 광섬유 번들을 통해 전달된 이미지를 CCD 카메라에 결상시켰다. 구성된 시스템의 성능을 검증하기 위해 앞서 실험에서 사용한 $500\ \mu\text{m}$ 의 높이 차이를 가지는 단차 시편을 측정하였고, 실험은 $7.5\ \mu\text{m}$ 간격으로 전체 1.5 mm의 거리만큼 시편을 구동하면서 진행되었다. 그림 41은 이중 이미징 광섬유 번들 기반 3차원 내시경에서 획득한 CSSIM 신호를 보여주고 있으며, 이는 단일 이미징 광섬유 번들을 사용한 실험 결과와 확연하게 가시도 차이를 보이는 동시에 연속 주사형 패턴 조사 현미경의 기본적인 CSSIM 신호와 유사함을 알 수 있다. 동일하게 푸리에 역푸리에 분석법으로 분석한 결과, 그림 42와 같은 시편의 3차원 형상을 복원할 수 있었으며, 게이지 블록 간의 높이 차이는 $500\ \mu\text{m}$ 로 계산되었다.

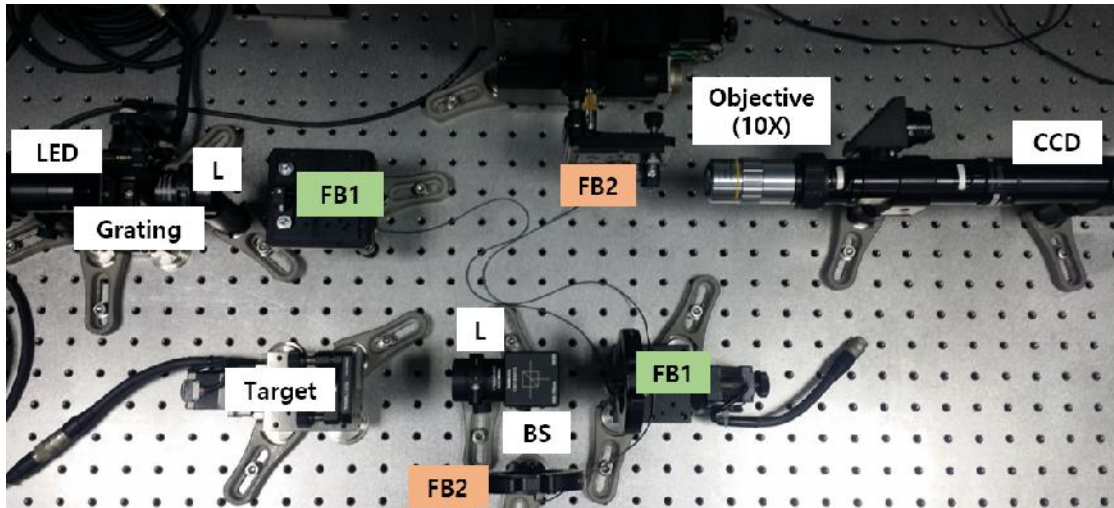


그림 40. 이중 이미징 광섬유를 이용한 3차원 내시경 광학 구성

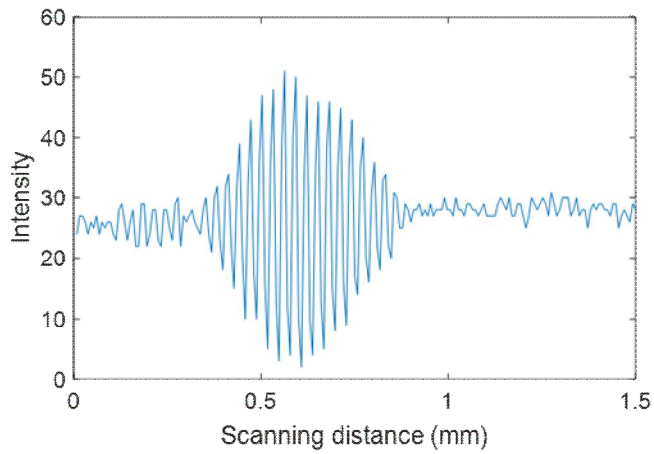


그림 41. 이중 프로브 실험 구성으로 획득된 CSSIM 신호

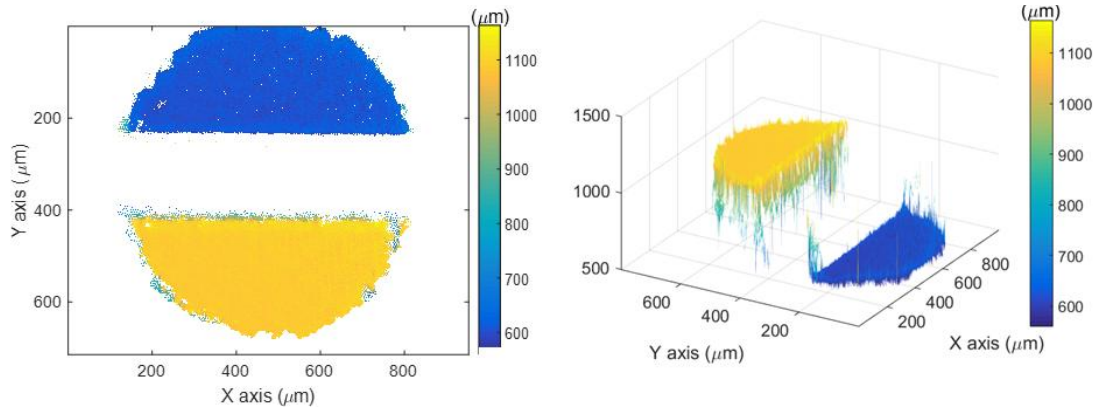


그림 42. 게이지 블록의 이중 프로브 실험 3차원 측정 결과

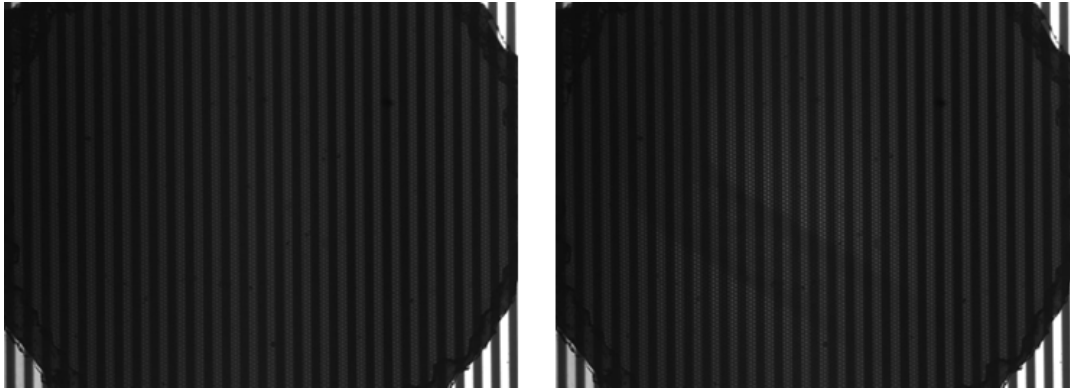
제4장 고찰 및 논의

본 연구에서는 연속 주사형 패턴 조사 현미경의 원리로 단일 이미징 광섬유 번들을 이용한 3차원 내시경을 제안하였다. 실험 결과 측정 시편에 대한 3차원 형상 복원 및 이를 정량화하는 것이 가능함을 확인하였으며, 전체 시스템의 성능을 개선하기 위해서는 다음과 같은 사항들을 추가로 고려해야 한다.

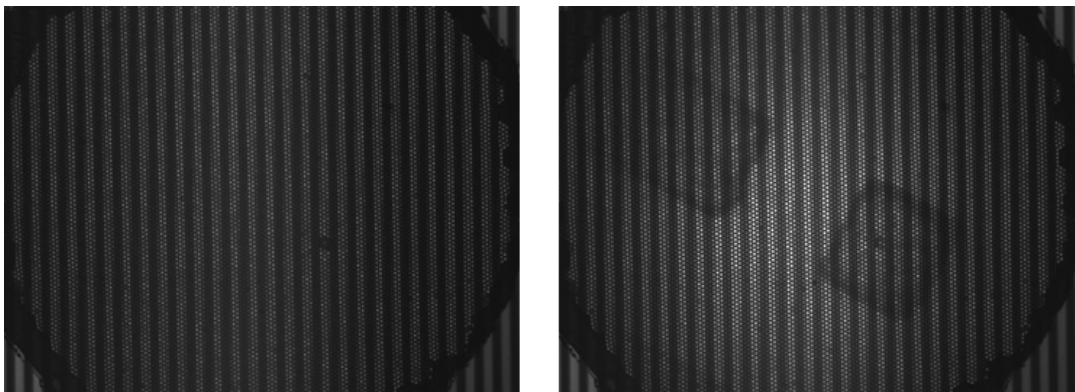
- 단일 광섬유 번들 사용으로 인한 한계
- 측정 영역 (Field of view, FOV)
- 대물렌즈의 수치 구경에 의한 종축 분해능
- 종축 구동
- 시스템의 측정 오차

1. 단일 광섬유 번들 사용으로 인한 한계

본 연구에서 이미징 광섬유 번들은 기존의 내시경 프로브의 광원 경로와 영상 경로를 일치시키기 위해 사용하였다. 하지만 이러한 광원 경로와 영상 경로의 동축 구성으로 인하여, 투과율 및 CCSIM 신호의 가시도 저하 현상이 발생하였다. 첫 번째로 이미징 광섬유 번들의 투과율은 앞서 실험에서 30% 정도임을 확인하였으며, 본 연구에서와 같이 내시경이 동축 구성인 경우에는, 광원의 빛이 이미징 광섬유 번들을 왕복으로 지나가기 때문에, 9%의 투과율을 가지게 된다. 이로 인해 높은 광량을 가지는 광원을 사용해야 하며 동시에 이미징 광섬유 번들 자체의 투과율을 높이려는 방안이 필요하다. 두 번째로 이미징 광섬유 번들에서 투과하지 못한 빛은 대부분의 경우 광섬유의 근부에서 반사되어 CCD 카메라로 되돌아간다. 이 경우, 광원부의 조명 패턴은 광섬유의 근부에서 반사되어 CCD 카메라에서 결상되며, 이러한 공간 패턴은 실제 시편에서 반사되어 돌아온 공간 패턴이 아니기 때문에 신호가 아닌 잡음으로 작용하게 되어 결국 CSSIM 신호의 가시도를 매우 저하시키게 된다. 실험에서 편광 광 분할기를 사용하는 대신 일반적인 광 분할기를 사용하는 경우, 이미징 광섬유 번들 근부의 반사로 인하여 조명의 공간 패턴이 그림 43(a)의 왼쪽 그림과 같이 나타나게 된다.



(a)



(b)

그림 43. 시편의 이미징 여부에 따른 가시도 차이 (a) BS, (b) PBS

이때, 시편에 의한 발생하는 공간 패턴이 CCD 카메라에 결상되는 경우, 그림 43(a)의 오른쪽 그림과 같이 나타나게 되며, 시편의 유무와 관계없이 광섬유 근부의 반사로 인하여 대부분의 조명 패턴이 형성됨을 알 수 있다. 그래서 결과적으로 이미징 광섬유 번들의 근부에서 반사된 패턴으로 인해 연속 주사형 패턴 조사 현미경의 원리 적용이 불가능하다. 그래서 본 연구에서는 이를 해결하기 위해 편광 광 분할기와 편광기와 같은 편광 소자를 사용하여 원하지 않는 광섬유 근부의 반사광을 제거하였다. 이 경우, 그림 43(b)와 같이 왼쪽 그림의 근부 반사광에 비해 오른쪽 그림의 시편에 의한 조명

패턴이 비교적 잘 관찰되고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 이론적으로 이미징 광섬유 번들이 등방성이지만, 실제로는 미세한 복굴절성을 가지기 때문에 통과하는 빛의 편광이 회전하고, 결국 편광 광 분할기 및 편광기에서 일정 부분 투과하여 CCD 카메라에서 검출되기 때문이다. 그리고 시편에서 반사된 패턴은 광섬유 근부에서 반사된 패턴에 의해 영향을 받기는 하나 CSSIM 신호 획득이 가능하기 때문에 본 연구에서 제안하는 3차원 내시경으로 형상을 측정할 수 있었다. 보다 높은 가시도의 내시경을 구성하기 위해서는 편광을 고려한 이미징 광섬유 개발 및 이미징 광섬유의 투과 효율을 높이는 기술이 필요하다.

2. 측정 영역(Field of view, FOV)

본 연구에서 구성한 시스템의 내시경 프로브의 초기 실험 결과에서 측정 영역은 1 mm 정도의 수준이었다. 이때의 광학 시스템은 단일 렌즈를 사용하여 프로브 이미징 렌즈를 구성하였고, 구성된 1X 광학계를 통해 그림 39와 그림 42와 같이 1 mm의 FOV를 가짐을 확인하였다. 그러나 실제 3차원 내시경의 응용을 고려하며 보다 넓은 측정 영역을 가지는 광학시스템이 구성되어야 하며, 이를 위해 본 연구에서는 4 mm의 FOV를 가지는 프로브 이미징 렌즈를 제작하여 실험을 진행하였다. 향후, 본 연구에서 제안하는 시스템으로 3차원 내시경이 상용화되는 경우, 프로브 이미징 렌즈의 최적 설계를 통해 보다 넓은 영역을 측정하기 위한 광학 설계가 진행되어야 한다.

3. 대물렌즈의 수치 구경에 의한 종축 분해능

연속 주사형 패턴 조사 현미경에서 획득되는 CSSIM 신호는 패턴의 위상 천이와 시편의 종축 방향 구동을 통해 시편에 대한 최적의 초점 위치 근처에서 획득된다. 이러한 영역은 일반적인 현미경 광학계의 초점심도에 해당하며, 초점심도는 렌즈의 수치 구경에 결정된다고 앞서 설명하였다. 이러한 수치 구경은 전체 시스템에 사용되는 렌즈들에 의해 결정되지만, 특히 이미징 광섬유 번들에서 나온 빛을 시편에 조사하기 위해 사용되는 프로브 이미징 렌즈의 수치 구경에 의해 크게 영향을 받는다. 결과적으로 사용한 프로브 이미징 렌즈의 수치 구경이 클수록 초점심도의 값이 작아지게 되어

CSSIM 신호의 폭이 좁아지게 되고 이로 인해 종축 방향의 분해능이 높아진다. 또한, 초점심도에서 벗어나는 경우와 비교하여 보다 충분한 빛을 획득할 수 있기 때문에 그림 37(b)와 그림 39(b)의 두 CSSIM 신호에서와 같이 가시도 차이가 발생할 수 있다고 생각된다. 그래서 본 연구에서 제안하는 3차원 내시경의 분해능을 개선하기 위해서는 프로브 이미징 렌즈의 수치 구경을 고려하여 시스템을 구성해야 한다.

4. 종축 구동

본 연구에서 제안하는 3차원 내시경은 연속 주사형 패턴 조사 현미경의 원리를 적용하고 있기 때문에, 광학 시스템에서 시편의 종축 구동 및 공간 패턴의 횡방향 구동이 필수적이다. 하지만 실제 응용 측면에서, 내시경 프로브의 기계적인 구동은 다양한 응용을 제한할 뿐만 아니라 측정 시간이 오래 걸린다는 단점을 가진다. 그래서 이러한 기계적 구동 부분을 편리하고 고속의 전자 주사 방식으로 대체하여야 한다. 공간 패턴의 횡축 구동의 경우, 공간 광 변조기 (spatial light modulator, SLM)와 변형 가능한 미러 장치 (deformable mirror device, DMD)를 사용하여 이를 대체할 수 있다. 또한, 초점 가변 렌즈 (focus tunable lenes)를 사용하는 경우, 시편의 기계적인 종축 구동 대신 렌즈 시스템의 작동 거리를 변경시켜 연속 주사형 패턴 조사 현미경의 측정이 가능하다. 비록, 초점 가변 렌즈의 초점 거리에 따라 FOV가 변화하는 문제점이 발생하기 때문에 이를 보완하려는 방안이 필요하며, 본 연구에서 적용하지는 못했으나 다양한 형태의 광학 설계 방법을 도입하여 이를 극복할 수 있을 것으로 생각한다. 그리고 이러한 전자 장치들을 사용한 3D 내시경은 실시간으로 관찰 및 검사를 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 측정 오차

본 연구에서 제안하는 3차원 내시경의 측정 오차로는 크게 구동 장치의 구동 오차와 렌즈 시스템에서 발생하는 수차에 의한 오차를 생각할 수 있다. 먼저, 조명부의 공간 패턴의 위상 천이와 시편의 종축 방향 구동을 위해 본 연구에서는 피드백 제어를 이용하지 않는 마이크로 스텝핑 스테이지를 사용하였고, 이로 인해 스테이지의 구동 오차

가 CSSIM 신호에 오차를 유발하여 3차원 형상 측정에 오차요인으로 작용하였다. 이를 줄이기 위해서는 구동 장치에 피드백 제어가 가능한 센서가 부착되어 있는 고정밀 구동 장치를 사용하여 정밀한 위상 천이 및 종축 구동을 구현함으로써 등간격의 CSSIM 신호를 획득하고 해석하여 정밀한 3차원 형상을 측정할 수 있다.

또한, 두 번째로 전체 시스템의 광학계에서 유발되는 렌즈 시스템의 수차는 측정되는 3차원 형상의 왜곡을 발생시켜 측정 오차를 유발한다. 특히, 현미경 광학계에서 가장 크게 시스템에 영향을 미치는 수차는 구면수차 (spherical aberration)로 본 연구에서 제안하는 3차원 내시경의 경우에도 이러한 구면 수차를 줄이기 위한 연구가 진행되어야 한다. 구면수차는 주로 렌즈의 바깥부분이 중앙보다 더 강하게 굴절이 일어나 발생하게 되는 수차로 단일 렌즈를 사용하는 것이 아니라 여러 개의 렌즈 조합으로 이를 극복할 수 있다. 또한 광학계의 수차를 포함한 전체 시스템의 측정 오차는 평면거울을 측정한 결과를 통해 보정하여 제거할 수 있으며, 이를 위해 측정 시편의 측정 전에 평면거울의 측정 결과를 확보하고, 측정 이후의 결과에서 이를 보정하면 전체적인 3차원 내시경의 성능을 개선시킬 수 있다.

제5장 결론

현재 내시경은 의료용뿐만 아니라 산업계에서 측정, 검사방법의 하나로 기계나 설비를 분해하거나 파괴하지 않고 자동차 엔진, 소형 배관, 기계 내부, 좁은 공간 등의 내부 파손 상태나 막힘, 부식, 마모 또는 동작 상태 등을 관찰하기 위한 시각 장비로도 연구, 개발되고 있다. 이는 현장에서 장비를 해체하는데 드는 시간과 인력, 비용 절감 등을 가능하게 하므로 내시경의 필요성은 산업 분야 전반에 확산되고 있으며 향후 응용 분야는 더욱 확대될 전망이다. 하지만 기존의 내시경은 일반적으로 2차원의 이미지만 획득하여 시각화하기 때문에, 시편에 대해 보다 정밀한 측정 및 분석에 한계를 가진다. 그래서 이를 보완하기 위해 깊이감을 재현한 3차원 내시경의 필요성이 대두되었고, 스테레오 방식 등의 다양한 3차원 이미징 기술 및 측정 기술을 적용한 3차원 내시경이 개발되었다. 그러나 기존에 개발된 3차원 내시경은 주로 관찰에 목적을 두고 있기 때문에, 측정 대상에 대한 정량적인 분석에 적합하지 않으며 측정 분해능이 좋지 못한 단점을 가진다. 이와 더불어, 내시경의 이미지 획득 원리상 측정 프로브의 크기가 수십 밀리미터 수준에 머물고 있어 미세한 틈이나 구멍 안쪽의 측정이 불가능하다.

그래서 본 논문에서는 기존에 개발된 내시경들을 분석하고 이를 통해 고분해능과 프로브 소형화에 초점을 맞춘 새로운 3차원 내시경에 대한 연구를 진행하였다. 3차원 형상 측정 원리로는 높은 분해능의 패턴 조사 현미경 원리를 적용하고, 단일 광섬유를 이용하여 광선 경로와 영상 경로를 일치시킨 동축의 이미징 광섬유로 소형화된 내시경을 개발하였다. 본 연구에 제안한 시스템을 검증하기 위해 단차를 가지는 게이지 블록과 동전에 대한 3차원 형상 측정 실험을 수행하였다. 그 결과, 서로 다른 게이지 블록의 두 영역의 높이 차이는 기준 값 $500 \mu\text{m} \pm 0.9 \mu\text{m}$ 에서 $501 \mu\text{m}$ 로 측정되었으며, 15번 반복 측정으로 인해 높이 맵의 평균값에 대한 반복성은 $16.1 \mu\text{m}$ 로 계산되었다. 또한, 동전의 3차원 형상 측정 결과를 확인함으로써 제안하는 3차원 내시경 시스템의 성능을 확인할 수 있었다. 한편, 본 논문에서는 제안하는 3차원 내시경의 개발 및 성능을 개선하기 위한 고려 사항들로 단일 광섬유 번들 사용으로 인한 한계, 측정 영역(Field of view, FOV), 대물렌즈의 수치 구경에 의한 종축 분해능, 종축 구동, 시스템의 측정 오차들에 대한 논의가 진행되었다.

[참고문헌]

- [1] G. Berci and K. A. Forde, "History of endoscopy: What lessons have we learned from the past?" *Surgical Endoscopy*, 14(1), 5 - 15, (2002).
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Basil_Hirschowitz
- [3] E. Dupont, F. Lamarque, C. Prella, and T. Redarce, ""Tri-dimensional optical inspection based on flexible image guide: first step toward 3d industrial endoscopy," *Proc. of the 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, 19, (2012).
- [4] J. Baran, and J. Walter, Inspection hole plug for gas turbine engine, U.S. Patent No. 4,406,580. (1983).
- [5] J. Geng, and J. Xie, "Review of 3-D Endoscopic Surface Imaging Techniques," *IEEE Sensors Journal*, 14(4), 945-960, (2014).
- [6] <https://www.manhattangastroenterology.com/procedures/upper-endoscopy-doc-t-nyc/>
- [7] <http://m.medigatenews.com/news/2572803308>
- [8] <https://www.olympus-ims.com/ko/rvi-products/>
- [9] 류지곤, "내시경의 구조," *대한소화기내시경학회지*, 29(1), 179-183, (2004).
- [10] <http://study.zum.com/book/12842>

- [11] H. Haneishi, O. Takashi, and M. Yoichi, "Profilometry of a gastrointestinal surface by an endoscope with laser beam projection," *Opt. Lett.*, 19(9), 601-603, (1994).
- [12] D. Stoyanov, A. Darzi, and G. Z. Yang, "Dense 3D depth recovery for soft tissue deformation during robotically assisted laparoscopic surgery," *Comput. Aided Surgery*, 10(4) 199 - 208, (2005).
- [13] M. Chiba, "Stereoscopic-vision endoscope system provided with function of electrically correcting distortion of image," U.S. Patent 5 860 912, 19, (1999).
- [14] S. Takahash, "Stereoscopic endoscope objective lens system having a plurality of front lens group," U.S. Patent 5, 743 846, (1998).
- [15] J. Geng, "Novel ultra-miniature flexible videoscope for on-orbit NDE," Xigen LLC, Rockville, MD, USA, Tech. Rep. NASA-104, (2010).
- [16] K. Ogawa, "Endoscope apparatus, method of operating the endoscope apparatus," U.S. Patent 7 443 488, (2008).
- [17] H. Lee, "3-dimensional moving image photographing device for photographing," U.S. Patent 0 040 606, (2009).
- [18] J. Geng, "Structured-light 3D surface imaging: A tutorial," *Adv. Opt. Photon.*, 3(2), 128 - 160, (2011).

- [19] J. Geng, “DLP-based structured light 3D imaging technologies and applications,” Proc. SPIE, 7932, 79320B-1 - 79320B-15, (2011).
- [20] A. Grocha, A. Seitela, S. Hempele, S. Speidelc, R. Engelbrechtd, J. Pennee, et al., “3D surface reconstruction for laparoscopic computerassisted interventions: Comparison of state-of-the-art methods,” Proc. SPIE, 7964, 796415-1 - 796415-9, (2011).
- [21] J. Penne, K. Höller, M. Stürmer, T. Schrauder, A. Schneider, R. Engelbrecht, et al., “Time-of-flight 3-D endoscopy,” in Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, vol. 5761. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 467 - 474, (2009).
- [22] Google Driverless Car [Online]. Available:
http://en.wikipedia.org/wiki/Google_driverless_car
- [23] Time-of-Flight Camera [Online]. Available:
http://en.wikipedia.org/wiki/Time-of-flight_camera
- [24] M. A. A. Neil, R. Juškaitis, and T. Wilson, “Method of obtaining optical sectioning by using structured light in a conventional microscope,” Opt. Lett. 22 (24), 1905 - 1907, (1997).
- [25] M. Vogel, Z. Yang, A. Kessel, C. Kranitzky, C. Faber and G. Häusler, “Structured-illumination microscopy on technical surfaces: 3D metrology with nanometer sensitivity,” Proc. of SPIE 8082, 80820S, (2011).

- [26] M. Minsky, “Memoir on inventing the confocal scanning microscope,” scanning, 10 (4), 128-138, (1988).
- [27] K. - N. Joo, “Fourier domain analysis on continuously scanned structured illumination microscopy,” Mea. Sci. Technol. 23, 057002, (2012).
- [28] L. Deck, and P. Groot, “High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry,” Appl. Opt. 33(31), 7334-7338, (1994).
- [29] P. Paul, and D. R. Walt, “ Analytical applications of optical imaging fibers,” Analytical chemistry, 67(15), 481A-487A, (1995).

이 력 서

성 명 : 박 효 미 (朴 孝 美)

학 력

- 2009.3. - 2012.2. 나주고등학교 졸업
- 2012.3. - 2016.2. 조선대학교 광기술공학과 학사 졸업
- 2016.3. - 2018.2. 조선대학교 광기술공학과 석사 졸업

학위 논문

- [1] “패턴 조사 현미경을 이용한 3차원 내시경 연구,” 석사학위논문, 조선대학교 (2018).

학술지 게재 논문

- [1] M. S. Choi, **H. M. Park** and K. -N. Joo, “Note: Near infrared interferometric silicon wafer metrology,” Rev. Sci. Instrum. 87, 046106, (2016).
- [2] **H. M. Park**, H. W. Jung and K. -N. Joo, “Dual low coherence scanning interferometry for rapid large step height and thickness measurements,” Opt. Express. 24, 28625-28632, (2016).
- [3] **H. M. Park**, M. S. Choi and K. -N. Joo, “6 DOF 정합을 이용한 대 영역 실리콘 웨이퍼의 3차원 형상, 두께 측정 연구,” J. Kocean Soc. Precis. Eng. 34, 1-8, (2017).
- [4] **H. M. Park** and K.-N. Joo, “High-speed combined NIR low-coherence interferometry for wafer metrology,” Applied optics. 56, 8592-8597, (2017).

특허 등록 및 출원

- [1] 주기남, 최문성, **박효미**, “높은단차 측정을 위한 이중 가간섭 백색광 주사 간섭 계,” 특허 10-1764868 (2017).

국내·외 학회 발표

- [1] 최문성, **박효미**, 주기남, “ 6 DOF 정합을 이용한 대영역 3차원 측정,” 한국정밀공학회 추계학술발표회 (2015).
- [2] **박효미**, 최문성, 주기남, “높은 단차 측정을 위한 이중 가간섭성 백색광 주사 간섭계,” 한국정밀공학회 춘계학술발표회 (2016).
- [3] **Hyo Mi Park** and Ki-Nam Joo, “Dual low coherence scanning interferometer for rapidly measuring large step,” ICPT (2016).
- [4] **Hyo Mi Park** and Ki-Nam Joo, “3D large step surface profile measurements by dual low coherence scanning interferometry,” OPTIC (2016).
- [5] **박효미**, 주기남, “이중 저간섭성 주사 간섭계,” 한국광학회 하계학술발표회 (2017).
- [6] **박효미**, 주기남, “패턴 조사 현미경을 이용한 3차원 내시경,” 한국광학회 하계학술발표회 (2017).
- [7] **박효미**, 김다슬, 김소연, 모하영, 최수빈, 주기남, “패턴 조사 현미경을 이용한 3차원 내시경,” 대한전자공학회 추계학술발표회 (2017).
- [8] **박효미**, 주기남, “연속 주사형 패턴 조사 현미경 기반 3D 내시경,” 한국정밀공학회 추계학술발표회 (2017).