



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](#)

2019년 8월
석사학위 논문

측면 파노라마 영상 구현을 위한
광섬유 내시경 프로브에 대한 연구

조선대학교 대학원

물리학과

강희원

측면 파노라마 영상 구현을 위한
광섬유 내시경 프로브에 대한 연구

A study on the development of optical endoscope probe
for side-view panoramic image

2019년 8월 23일

조선대학교 대학원

물 리 학 과

강 희 원

측면 파노라마 영상 구현을 위한
광섬유 내시경 프로브에 대한 연구

지도교수 최 은 서

이 논문을 이학 석사학위신청 논문으로 제출함

2019년 04월

조선대학교 대학원

물 리 학 과

강 희 원

강희원의 이학 석사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교 교수	박소희 (인)
위 원	조선대학교 교수	안태정 (인)
위 원	조선대학교 교수	최은서 (인)

2019년 05월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제 1 장 서 론	01
제 2 장 이론적 배경	05
제 1 절 측면 영상신호 획득 방법	05
1. 프로브 빔의 측면 조사	05
2. 프로브 빔의 기계적 회전	06
제 2 절 측면 영상 획득을 위한 광학 소자	08
1. 광전달을 위한 광섬유 다발	08
2. 그린 렌즈(GRIN lens)	09
3. 전방 반사를 위한 원뿔형 거울	14
제 3 절 측면 영상의 파노라마 영상 구현	15
1. 영상 unwrapping을 통한 파노라마 영상 구현	15
2. 파노라마 영상 구현을 위한 좌표 변환	16
제 3 장 실험	18
제 1 절 광섬유 다발만을 이용한 평면 영상 구현	18
제 2 절 원뿔형 거울을 이용한 영상 구현	24
제 3 절 이미지 unwrapping을 통한 원통 내부의 표면 영상 구현	29
제 4 절 원통 내부 조영을 위한 광프로브 개발	40
제 5 절 측면 형광 영상 구현	52
제 6 절 그린 렌즈를 이용한 측면 파노라마 영상	57
제 4 장 결 론	69
참고문헌	71

List of Figures

그림 2-1. 측면 영상을 위한 광진행 방향을 전환하기 위한 광프로브의 광소자. (a) 소형 반사체를 이용하는 방법, (b) 광섬유 볼렌즈를 이용하는 방법	05
그림 2-2. 측면 영상 구현을 위한 프로브 빔의 회전 방법. (a) 광프로브를 회전시키는 방법, (b) 반사체를 회전시키는 방법	06
그림 2-3. 측면 영상 구현 방법. (a) 기존의 기계적인 스캐닝 방법, (b) 기계적인 스캐닝 방법을 이용하지 않는 방법	07
그림 2-4. 광섬유 다발의 내부 구조 종류. (a) 기준형 다발, (b) 무작위 광섬유 다발, (c) coaxial 광섬유 다발	08
그림 2-5. 그린 렌즈를 이용한 광선 추진 시뮬레이션 수행 결과. (a) 그린 렌즈에서의 광선 진행 경로, (b) 그린 렌즈 스폿 다이어그램	10
그림 2-6. 그린 렌즈 효과에 대한 개략도. (a) 그린 렌즈 굴절률 분포와 그에 따른 렌즈 효과, (b) 두 개의 렌즈와 동일한 효과를 가지는 서로 다른 두 그린 렌즈의 조합, (c) 광섬유 다발과 그린 렌즈에 의한 효과, (d) 단일 코어 광섬유와 그린 렌즈에 의한 효과	12
그림 2-7. 그린 렌즈의 다양한 피치별 광의 진행과 결상된 상의 차이	13

그림 2-8. 원뿔형 거울이 사용된 캡슐 내시경의 구조도	14
그림 2-9. 원뿔형 거울을 이용하여 촬영한 파노라마 영상	14
그림 2-10. (a) 원뿔형 거울에 비친 상의 모습, (b) 평면 영상으로 복원된 원래의 이미지 형태	15
그림 2-11. 원통형 샘플 내부 좌표와 원뿔형 거울에 표면의 영상 좌표와의 매핑 관계	16
그림 2-12. 원형 영상을 평면 파노라마 영상으로 매핑하기 위한 좌표. (a) 원형 영상에서의 좌표, (b) 파노라마 영상에서 대응되는 좌표	77
그림 3-1. 광섬유 다발과 멀티캠을 이용하여 영상을 구현하기 위한 개략도	18
그림 3-2. 사용한 광섬유 다발의 단면 모습	19
그림 3-3. 광섬유 다발을 이용하여 C, E, S가 쓰인 종이샘플을 구현한 영상. (a) C, E, S 중 E, S만 초점이 잡힌 영상, (b) C, E, S 중 E, S는 초점이 잡히고 C는 초점이 잘 맞지 않은 영상, (c) C, E, S 모두 초점이 잡힌 영상, (d) C, E, S 모두 초점이 잘 맞은 영상	20
그림 3-4. (a) 광섬유 다발을 이용하여 CES Lab이 쓰인 종이샘플을 구현한 영상, (b) 사용된 샘플	21

그림 3-5. (a) 광섬유 다발을 이용하여 0.1 mm 단위의 눈금이 새겨진 유리 샘플을 구현한 영상, (b) 0.1 mm 단위의 눈금이 새겨진 유리샘플 23

그림 3-6. 원뿔형 거울을 이용한 영상 구현을 위한 개략도 25

그림 3-7. 일부가 잘린 좁고 일정한 간격의 대각선 격자무늬. (a) 광이 들어가는 각도가 틀어지고 초점이 맞지 않은 상태, (b) 광이 들어가는 각도가 잘 맞고 초점이 맞은 상태 25

그림 3-8. 일부가 잘린 폭이 넓고 일정한 간격의 일자무늬. (a) 광이 꺾여 들어가 초점이 맞지 않음, (b) 입사광의 각도를 조절함, (c) 광이 들어가는 각도가 수평이 됨 27

그림 3-9. (a) 원뿔형 거울에 반사된 좁고 일정한 간격의 격자무늬, (b) 좁고 일정한 간격의 격자무늬 샘플 28

그림 3-10. LED를 종이샘플의 뒤에서 비추었을 때 평면 영상을 재구현하기 위한 개략도 29

그림 3-11. (a) LED를 알파벳 대문자가 쓰인 종이샘플의 뒤에서 비추었을 때 랩뷰 프로그램을 통해 재구현된 평면 영상, (b) 알파벳 대문자가 쓰인 종이 샘플 30

그림 3-12. LED를 종이 샘플의 대각선 방향에서 비추었을 때 측면 평면 영상을 재구현하기 위한 개략도 31

그림 3-13. LED를 종이샘플의 대각선에서 비추어 주고, 랩뷰 프로그램을 통해 재구현된 평면 영상. (a) 알파벳 대문자가 쓰여진 종이샘플, (b) 숫자가 쓰여진 종이샘플, (c) 구멍이 뚫린 격자모양의 종이샘플	32
그림 3-14. (a) 알파벳 대문자와 숫자가 쓰여진 종이샘플, (b) 좁고 일정한 간격의 구멍이 뚫린 격자무늬 샘플 중 아랫부분	32
그림 3-15. 광원단과 샘플단의 각도가 90도일 때의 개략도	34
그림 3-16. 광원단과 샘플단의 각도가 90도일 때 보이는 원뿔형 거울 영상	34
그림 3-17. 광분배기 반사광을 줄이기 위한 광정렬 개략도	35
그림 3-18. 샘플단의 입사각을 기울여 입사했을 때 원뿔형 거울에 비친 영상. (a) 전체적으로 초점이 맞지 않고 중심에 집결된 광이 큼, (b) 광이 원뿔형 거울의 왼쪽에 쏠려 샘플영상이 왼쪽에만 보임, (c) 광이 전체적으로 퍼져서 모든 위치의 샘플 영상을 확인가능	37
그림 3-19. 좁고 일정한 간격의 구멍이 뚫린 격자무늬 샘플 중 윗부분	37
그림 3-20. 샘플단의 입사각을 기울여 입사하고 임의로 원뿔형 거울 중심에 집결되는 광을 가렸을 때의 원뿔형 거울 영상. (a) 초점이 맞지 않고 가려진 범위가 넓음, (b) 광이 전체적으로 퍼져서 아래 일부 가려진 부분을 제외한 모든 위치의 샘플이 보임	38

그림 3-21. (a) 한글 자음이 쓰인 일부를 절단한 샘플의 입사각을 기울어 입사하였을 때의 평면 영상, (b) 사용된 샘플	39
그림 3-22. 중심에 집결되는 광을 분산시키기 위한 엑시콘 렌즈	40
그림 3-23. 엑시콘 렌즈에서 퍼지는 광을 콜리메이션 시키기 위한 방법	41
그림 3-24. 엑시콘 렌즈를 이용한 실험 개략도	43
그림 3-25. 종이샘플이 반사된 원뿔형 거울 영상을 랩뷰 프로그램을 통해 재구현한 평면 영상. (a) 한글 자음이 새겨지고 중간이 잘린 종이샘플의 한글 자음 부분 영상, (b) 한글 자음이 새겨지고 중간이 잘린 종이샘플의 백지 부분, (c) 격자무늬에 구멍이 뚫린 종이샘플의 영상	43
그림 3-26. 샘플의 측면 조영을 위한 광프로브 개략도	45
그림 3-27. 광섬유 다발에 의해 보이는 원뿔형 거울의 영상	45
그림 3-28. ROI 설정 이후에 설정된 영역에 대해서 재구현된 평면 영상. (a) 원뿔형 거울을 측정할 영상에 ROI가 설정된 모습, (b) (a)의 ROI에 대해서 평면영상으로 재구현된 결과 영상	46
그림 3-29. 원통형 내부 측면 영상을 획득하기 위한 개략도	47
그림 3-30. (a) 색이 다른 줄무늬가 새겨진 종이 샘플의 원뿔형 거울의 ROI 설정영상,	

(b) (a)를 랩뷰 프로그램을 통해 재구현한 평면 영상, (c) 색이 다른 줄무늬가 새겨진 종이 샘플	48
그림 3-31. 측면 파노라마 영상 구현을 위한 개략도	49
그림 3-32. (a) 1인치 광섬유 다발을 이용하여 획득한 측면 파노라마 영상, (b) (a)의 샘플의 모습을 본 뜬 영상, (c) 사용된 샘플	50
그림 3-33. (a) 3인치 광섬유 다발을 이용하여 획득한 측면 파노라마 영상, (b) (a)의 샘플의 모습을 본 뜬 영상, (c) 사용된 샘플	51
그림 3-34. 형광 영상 획득을 위한 개략도	52
그림 3-35. (a) CMOS 카메라를 통해 볼 수 있는 원뿔형 거울에 비추어진 형광영상, (b) (a)의 영상을 랩뷰 프로그램을 통해 재구현한 평면 영상	53
그림 3-36. 형광현미경을 통해 본 형광비드의 모습. (a) Bright field, (b) blue, (c) green, (d) red	54
그림 3-37. 형광 파노라마 영상 획득을 위한 개략도	55
그림 3-38. (a) 32개의 평면영상을 이어 붙여 만든 형광 파노라마 영상, (b) (a)의 샘플의 모습을 본 뜬 영상, (c) 사용된 샘플	56
그림 3-39. 그린 렌즈를 이용한 평면영상획득을 위한 개략도	57

그림 3-40. (a) 그린 렌즈를 통해 보이는 샘플의 평면 영상, (b) 가로, 세로 약 2.2 mm인 격자무늬에 글씨를 써 넣은 샘플	58
그림 3-41. 그린 렌즈와 스테이지를 이용한 영상 획득을 위한 개략도	59
그림 3-42. 그린 렌즈와 스테이지를 이용하여 획득한 영상. (a) 구역 1의 영상, (b) 구역 2의 영상, (c) 구역 3의 영상, (d) 구역 4의 영상	60
그림 3-43. 멀티캠과 그린 렌즈를 이용한 평면 영상의 종이 샘플	60
그림 3-44. 멀티캠과 그린 렌즈를 이용한 평면 영상의 종이 샘플 원본	61
그림 3-45. CMOS 카메라를 이용한 영상 획득을 위한 개략도	62
그림 3-46. CMOS 카메라를 이용하여 획득한 영상. (a) 구역 1의 영상, (b) 구역 2의 영상, (c) 구역 3의 영상, (d) 구역 4의 영상, (e) 구역 5의 영상, (f) 종이 샘플	63
그림 3-47. 그린 렌즈를 이용하여 형광 영상 획득을 위한 개략도	64
그림 3-48. 그린 렌즈를 이용하여 획득한 형광 영상. (a) 전등을 켜고 광원을 끈 경우의 숫자 1, (b) 전등을 켜고 광원을 켜 경우의 숫자 1, (c) 전등을 끄고 광원을 켜 경우의 숫자 1, (d) 전등을 켜고 광원을 끈 경우의 숫자 2, (e) 전등을 켜고 광원을 켜 경우의 숫자 2, (f) 전등을 끄고 광원을 켜 경우의 숫자 2	65

그림 3-49. 그린 렌즈를 이용하여 형광 영상 획득을 위한 샘플	66
그림 3-50. 그린 렌즈를 이용하여 형광 파노라마 영상 획득을 위한 개략도	66
그림 3-51. 그린 렌즈를 이용하여 획득한 형광 파노라마 영상. (a) Inverse OFF, (b) Inverse ON, (c) (a)의 샘플의 모습을 본 뜬 영상, (d) (b)의 샘플의 모습을 본 뜬 영상	67
그림 3-52. 형광 파노라마 영상 획득을 위해 사용한 샘플 문자 이미지	68

List of Tables

표 3-1. Number of line pairs / mm in USAF resolving power test target 1951	61
---	----

ABSTRACT

A study on the development of optical endoscope probe for side-view panoramic image

Hui Won Kang

Advisor : Prof. Eun Seo Choi, Ph.D.

Department of Physics

Graduate School of Chosun University

In this paper, we introduce optical probes that can acquire side view optical images at one time without using a mechanical scanning device. In the conventional optical image acquisition method, irradiated light beam is rotated by using a mechanical scanning device. However, in this method, not only the image acquisition takes a long time but also the synchronization of operational speed between the mechanical rotation and the image acquisition is not properly performed, thus causing a problem in detecting an accurate optical image. To solve this problem, an optical probe capable of transmitting light to a cylindrical sample and receiving reflected light using a cone-shaped reflecting mirror is proposed. By using the proposed side-view optical imaging probe, I confirmed the potential of the proposed method by acquiring images of the pattern and characters written on the inner surface of the cylindrical sample and the fluorescent image of the surface overlaid with the fluorescent beads.

제 1 장 서 론

원통형 형태를 가지는 샘플의 내부 구조를 조사하는 방법은 광단층영상()을 위한 광프로브를 적용하는 방법에서 가장 활발한 연구가 진행되고 있다. 광프로브를 이용하여 광단층영상을 획득하기 위해서는 광섬유를 이용하여 광을 전달하고 이 광이 샘플에 조사되도록 소형광학계를 구성하여 기계적인 움직임의 도움으로 스캐닝을 수행하는 방법을 이용하고 있다. 이 방법은 초음파를 이용하여 혈관을 조영하기 위한 혈관 내 초음파(intravascular ultrasound, IVUS)에서 사용하는 방법을 이용하여 광섬유와 연결된 그린렌즈의 끝단에 프리즘으로 빛의 방향을 수직으로 바꾸어주도록 설계되었고, 이 프로브 전체가 외부에서 회전시켜주는 토크에 의해서 회전하도록 설계되었다 [1]. 그러나 넓은 영역으로 스캔 영역을 확장하는데 한계를 가지고 있어 프로브 전체를 광섬유 길이 방향으로 수평 이동시키기 위한 기계적인 움직임이 추가되어 발전하였다. 따라서 빛의 스캔 경로가 단순한 원형이 아니라 나선형 모양으로 진행되도록 설계하여 보다 넓은 영역으로 스캔 영역을 확장시켰다. 하지만 나선형으로 스캔을 수행하기 위해서는 회전력과 함께 프로브를 이동시키는 힘이 균일하게 전달되어야만 가능하였다. 이를 위해서 혈관용 OCT 광프로브는 나선형으로 가공된 가이드를 따라서 나선형으로 회전하면서 이동하는 방법을 이용하고 있다 [2~4].

광프로브의 전달길이가 길게 만들어지는 경우 외부에서 가해지는 회전력이 광프로브에 전달되는데 있어 전달력의 손실이 발생할 수 있으며 이로 인해 광신호의 안정성을 확보하는데 어려움을 겪게 되었다. 또한 광프로브를 회전하는데 기계적인 강도가 한계가 있기 때문에 광커플링을 위한 회전 결합장치가 필요하게 되었다. 이러한 경우에는 광축이 정밀하게 맞아야 광손실이 최소화되므로 회전을 유지하면서 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 매우 정밀한 가공이 필요하며 고속 회전을 지지할 수 있는 기계설계도 필수적이다. 가장 고속으로 운행이 가능한 경우 약 200 rps(revolutions per

second) 까지 동작이 가능하였다 [5].

이러한 단점을 극복하기 위해서 광프로브에 회전력을 전달하는 방법에서 광섬유를 통해서 전달된 광이 수직으로 꺾여 전달되는 소형 광소자에 직접 소형 모터를 장착하여 직접 회전시키는 방법을 이용하게 되었다 [6~7]. 이러한 방법은 외부 회전력을 전달할 필요가 없는 장점으로 인해서 최근 활발하게 개발되는 방법이다. 광원의 파장가변 성능이 수 MHz 정도로 향상됨에 따라 회전시 최대 가능한 속도가 4,000 fps(frames per second) 정도로 향상될 수 있었다 [8]. 하지만 광프로브의 특성상 원통형의 내장 기관을 검사하기 위해 삽입되는 기도와 같은 기관이 직선으로 펼쳐진 형태가 아니기 때문에 원활하게 굽어진 경로를 통해서 진입하기 위해서는 소형으로 제작되어야 한다. 소형 모터를 이용한 경우 프로브의 크기가 가장 작은 직경은 1.5 mm 정도였으나 외부에서 회전시키는 방법을 이용하는 경우 제작된 가장 작은 프로브의 직경이 1.0 mm이다. 이 점을 고려할 때 소형 모터의 사용이 프로브 전체의 부피를 줄이는데 단점이 된다는 것을 쉽게 예상할 수 있다. 그러기 위해서는 보다 크기가 작은 소형 모터가 필요하며 고속으로 회전이 가능한 모터의 성능이 요구되기 때문에 이러한 기술적인 면을 만족할 만한 저가의 소자 개발이 필요한 시점이다.

원통형 내부의 광영상 획득을 위한 프로브는 회전력을 이용하는 방법이 필수적이고 사용할 수 있는 방법도 그리 많지 않은 문제점을 가지고 있다. 이에 비해 광섬유 길이 방향에 나란한 전면을 관측하는 광프로브는 사용할 수 있는 방법이 보다 높은 자유도를 가지고 개발되었다. 광섬유에 금속 비드를 붙이고 이를 전자기적으로 제어하는 방법 [9,10], 압전 소자(PZT, piezoelectric actuator)를 이용하여 회전시키거나 평면 스캐닝을 수행하는 방법 [11~14] 그리고 가장 널리 이용된 마이크로 전기 기계 시스템(MEMS, microelectromechanical systems)을 이용한 방법이 개발되었다 [15~20]. 이외에도 두 개의 그린 렌즈 쌍을 이용하여 회전시켜 전면 스캐닝 방법을 구현한 방법 등이 소개되었다 [21]. 전면을 스캔하는 방법으로는 광섬유 번들을 이용하는 방법도 제안되었다 [22~25].

광프로브를 이용하여 측면에서 발현하는 형광영상을 구현한 결과는 아직까지는 많이

발표되지 않았다. 대부분의 연구결과는 전면에서 발현하는 형광신호를 측정하는데 집중되었고, 측면에서 발현하는 형광을 측정한 결과는 측면 광단층영상을 획득하기 위한 광단층영상 프로브와 접목된 광프로브를 통해서 획득되었다. 일반적인 광단층영상 프로브는 형광신호를 취득하는데 적합하지 않은 단일모드 광섬유로 만들어졌기 때문에 특별한 구조를 가지는 광프로브 디자인을 요구하였다. 초기에 제안된 광프로브의 경우에는 두 개의 광프로브를 각각 이용하는 방법이었다 [26]. 하지만 이중 클래드 구조를 가지는 광섬유(DCF, double-clad fiber)를 이용하여 이러한 문제점을 효과적으로 극복할 수 있었다 [27]. 측면 광프로브를 이중 클래드 광섬유로 가공하여 제작한 광프로브는 25 fps의 영상 구현 속도를 확보할 수 있었다 [28]. 하지만 이 방법 역시 이전 광프로브와 같이 회전력을 전달하는 금속 코일에 연결하여 당기는 방식으로 광프로브를 광섬유 길이 방향으로 이동시키면서 이중 클래드 광섬유를 연결하는 광커플링 소자(rotary joint)를 이용하여 회전시키는 방식을 이용하였다. 이러한 방법은 광섬유 소자를 직접 회전시키는 마이크로 모터를 직접 연결함으로써 광결합 손실과 기계적 회전에서의 불안정성을 극복할 수 있었으며 고속의 형광영상 취득이 가능하게 하였다 [29,30]. 이러한 장점의 가장 큰 요인은 이중 클래딩 광섬유를 이용하여 제작한 광결합기를 사용함으로써 광단층영상을 위한 신호와 형광신호를 광섬유 하나에서 서로 다른 채널을 통해서 전달할 수 있었기 때문이다.

본 논문에서는 이러한 기계적인 회전력을 이용한 소형 모터의 도움 없이 원통형의 샘플 내부의 광영상을 획득할 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 수직으로 광경로를 꺾는 방법을 모든 방향에 한 번에 적용하기 위해서 평면 반사체가 아닌 원뿔형 거울을 이용하고, 단일 광섬유가 아닌 광섬유 다발을 이용하여 광전달을 하였다. 또한 단일 수광소자가 아닌 2차원 평면 카메라를 이용하여 모든 각도에서 반사되어 수광되는 광을 한 번에 수광할 수 있도록 광학설계를 수행하였다. 개발된 광섬유 다발을 기반으로 하는 측면 광영상이 가능한 내시경 형태의 광섬유 프로브를 이용하여 원통형 샘플 내부의 표면 및 형광영상을 획득하여 기존의 내시경의 기능을 수행함은 물론 추가적인 기

능적인 영상의 획득이 가능함을 확인하고자 하였다. 소형 광학계로 광프로브를 구성하기 위해서 원뿔형 거울 앞에는 그린 렌즈를 이용하여 광을 집속하고, 반사되어 되돌아오는 광을 다시 광섬유 다발에 결합시키는데 활용하였다. 초기 실험 조건을 설정하는 단계부터 시작하여 보다 선명한 전면 영상을 확보하고 그린 렌즈를 통해서 영상의 해상도를 향상시키는 과정을 기술하였다. 또한 안정적으로 영상을 획득하고 이를 이해하기 쉬운 평면영상으로 *unwrapping*한 결과를 제시함으로써 측면 영상을 파노라마 영상으로 구현이 가능함을 제시하고자 하였다. 또한 종이 표면 위에 형광 비드를 이용해서 형광 샘플을 모사하였고 이 형광영상을 여기 광원을 이용하여 형광 발현된 결과를 영상으로 획득하였다. 이에 제안된 새로운 광프로브는 효율적인 광영상을 획득하는데 응용 가능할 것으로 예상하는 바이다.

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 측면 영상신호 획득 방법

1. 프로브 빔의 측면 조사

기존의 측면 영상을 획득하기 위한 방법은 다음과 같이 먼저 측면으로 프로브 빔을 향하게 광학계를 설계하고 이 프로브 빔을 이동시키는 방법을 이용하였다. 광섬유를 통해서 전달되는 프로브 빔을 원통형 샘플 표면 쪽으로 향하기 위해서 다양한 광학계를 이용할 수 있다. 그림 2-1(a)에서 보이는 소형의 반사체를 이용하여 방향을 전환시킬 수 있는데 이때 평면뿐만 아니라 곡면 반사체를 이용하여 렌즈의 효과를 부여하기도 하였다. 보다 발전된 방법으로는 광섬유에 정교하게 가공된 광섬유 볼렌즈를 연결하여 렌즈 효과를 직접적으로 활용하는 방법이다. 그림 2-1(b)에서 보이는 볼렌즈를 광섬유를 아크에 노출시켜 제작한 것으로 볼렌즈 일부를 가공하여 반사면을 형성하고 다른 일부는 렌즈로써 작용하는 효과를 줄 수 있어 작은 소형 광프로브를 개발할 수 있는 장점을 가진다 [31].

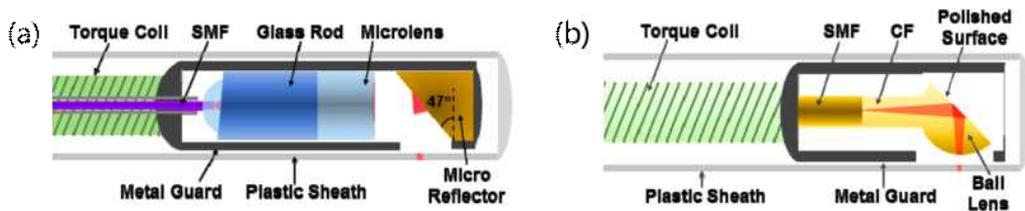


그림 2-1. 측면 영상을 위한 광진행 방향을 전환하기 위한 광프로브의 광소자. (a) 소형 반사체를 이용하는 방법, (b) 광섬유 볼렌즈를 이용하는 방법

2. 프로브 빔의 기계적 회전

이렇게 개발된 광프로브는 측면 영상을 획득하기 위해서 회전을 시킬 필요가 있다. 회전을 위해서는 광프로브 자체를 회전시키거나 반사체 역할을 하는 광소자 부분만이 회전하는 방법이 있다. 초기에는 광프로브를 회전시키는 방법을 이용하였지만 최근에 개발되는 광프로브는 후자의 방법을 택하고 있다 [31].

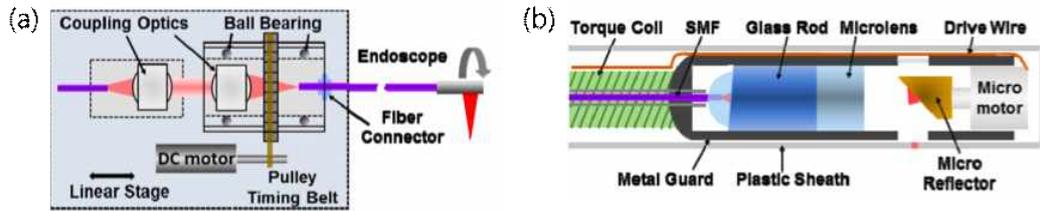


그림 2-2. 측면 영상 구현을 위한 프로브 빔의 회전 방법. (a) 광프로브를 회전시키는 방법, (b) 반사체를 회전시키는 방법

기존의 측면 광학 영상을 구현하기 위해서는 그림 2-3(a)에서 보이는 바와 같이 한 점에서 스캐닝을 수행하는 방법을 기초로 하여 광프로브 또는 프로브 빔을 회전시켜 원형 궤적에서 반사되는 광신호를 수집하는 방법을 이용하였다. 이렇게 하여 획득할 수 있는 광학 영상으로는 현미경을 이용하는 공초점 현미경 영상을 통한 표면 영상을 획득하거나 형광 신호 또는 단층 영상 신호를 취득하여 구조 및 기능성 영상을 구현할 수 있었다. 측면에서 반사되는 신호를 취득하는 방법은 광학적인 여러 기법의 적용이 가능하지만 대부분의 광프로브의 경우 기계적으로 회전시키는 방법을 통해서 구현되었다. 대부분의 광프로브는 광의 전달 방향을 조절할 수 있는 기능을 가지고 있지 않기 때문에 외부적인 회전력이 부여되어야 가능하였다. 새롭게 제안한 방법은 그림 2-3(b)와 같이 광프로브 내부 또는 외부에서 기계적인 동작이 전혀 없는 방법이다 [32]. 제안

한 방법은 샘플의 표면에 전달되는 광이 특정 위치에만 조사되는 것이 아니고 반사거울을 통해서 측면 전면에 조사되기 때문에 큰 직경을 가지는 광의 형태로 반사 거울에 입사된다. 샘플 내부의 측면 영상을 한 번에 획득하기 위해서는 측면 위치에 대한 광의 조사가 다중 위치에서 이루어져야하기 때문에 반사경을 평면 형태가 아니라 입체적으로 구현할 필요가 있게 되었다. 입사광이 평행광이라고 가정할 때 가장 효율적인 수광이 이루어지기 위해서는 거울 면에 45°입사각을 균일하게 유지할 필요가 있기 때문에 원뿔형 거울을 이용하는 것이 유리하였다. 그래서 입사광의 방향을 원뿔형 거울을 이용하여 전 방향으로 퍼지도록 바꾸고 다시 표면에서 반사되거나 발현된 형광을 동일한 반사 거울을 통해서 수광하도록 광정렬을 설계하였다. 본 실험에서는 평행광을 전달하는데 있어서 내시경의 활용을 염두에 두고 광섬유 막대(fiber rod)를 이용하였다.

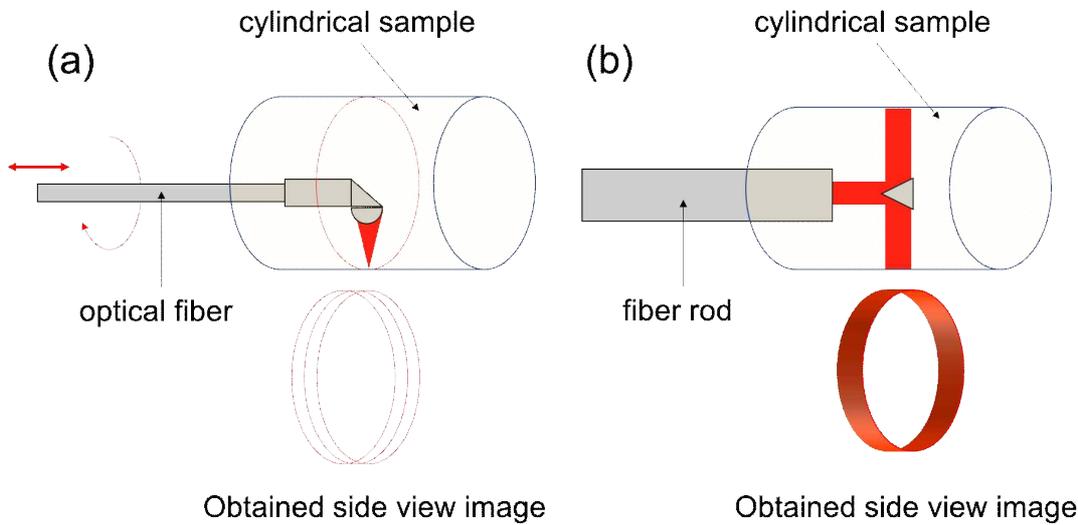


그림 2-3. 측면 영상 구현 방법. (a) 기존의 기계적인 스캐닝 방법, (b) 기계적인 스캐닝 방법을 이용하지 않는 방법

제 2 절 측면 영상 획득을 위한 광학 소자

1. 광전달을 위한 광섬유 다발

광섬유 다발이란 완충부가 붙어 있지 않은 광섬유의 묶음을 이야기하며, 광섬유 케이블이라고도 불린다. 광학적 또는 기계적으로 격리된 광섬유를 포함하여 각각 별도의 채널이 되는 광섬유 케이블과 달리, 보통 단일 전송 채널로써 사용된다. 광통신에서 광을 전송하는 데만 사용되는 광섬유 다발은 구부리기 쉽고, 전형적으로는 정렬되어 있지 않다. 광의 상을 전송하기 위해 사용되는 광섬유 다발은 구부리기 쉽고, 굵고 단단해도 좋으나 정렬된 광섬유를 포함해야 한다. 광섬유 다발의 내부구조는 다양한 형태로 되어있으며, 아래의 그림 2-4에서 보이는 바와 같이 같은 종류의 소형 광섬유가 균일하게 분포되어 있는 기준형 다발, 두가지 이상의 소형 광섬유가 무작위로 분포되어 있는 광섬유 다발 그리고 coaxial 광섬유 다발 등이 있다.

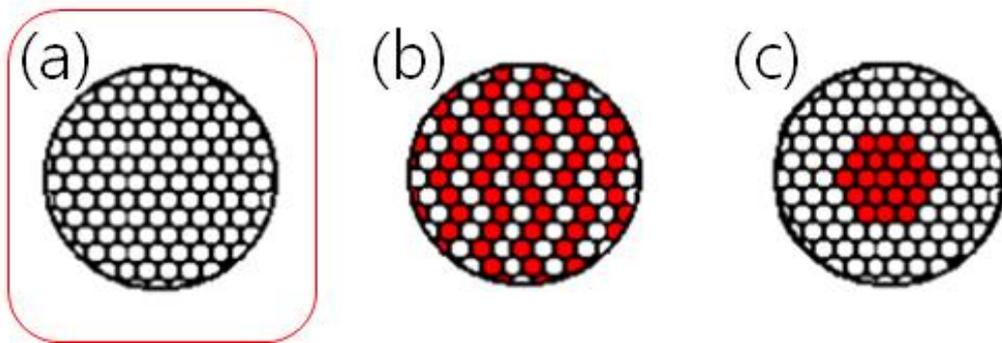


그림 2-4. 광섬유 다발의 내부 구조 종류. (a) 기준형 다발, (b) 무작위 광섬유 다발, (c) coaxial 광섬유 다발

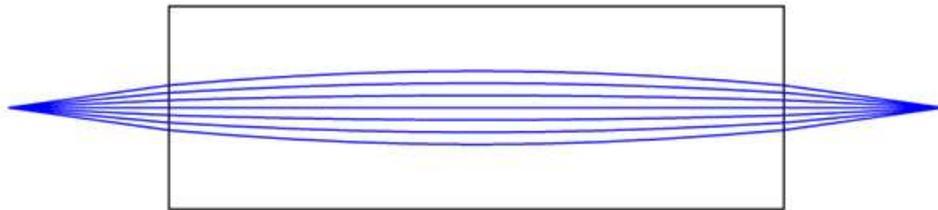
본 논문의 실험 진행을 위해서 2-4(a)의 기준형 다발을 이용하였는데 이는 실험의 목표가 광의 굴절률을 변화시키거나 코어의 크기를 다르게 하는 광을 이동시키는 게 목적이 아닌 선명한 영상을 획득하기 위해서이다.

2. 그린 렌즈(GRIN lens)

그린 렌즈(GRIN lens, Gradient Index lens)는 단면 구성으로 재질 내에 굴절률(refractive index)의 지속적인 변화로 초점을 만든다. 그린 렌즈는 일반적으로 중심 부근에서 굴절률이 높고 바깥으로 향할수록 굴절률의 값이 감소하는데 이 감소하는 정도가 계단 모양이 아니고 점차적으로 작아지는 특징을 가진다. 비구면과 같은 복잡한 표면 수치를 없애고 특정 유효 거리를 위해 디자인하여 광학 시스템에 적용하기 쉬운 특징을 가지고 있다. 레이저 다이오드에서 발산되는 광을 광섬유에 광결합시키는 용도에 적합하며 렌즈의 크기와 사용 가능한 파장 대역이 다양하다.

그림 2-5(a)는 광섬유에서 광섬유로 1:1 광결합되었을 때 그린 렌즈를 투과하는 광선의 예상도이며, 그림 2-5(b)는 그린 렌즈에 의해서 만들어지는 이론적인 초점 크기의 예상도이다. 원통형으로 만들어진 그린 렌즈는 입사되는 광과 방출되는 광을 살펴보면 하나의 렌즈와 같은 역할을 하고 있다. 그리고 일반 렌즈보다도 작은 크기로 제작이 쉽기 때문에 소형 렌즈를 대체할 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히 광섬유를 이용하는 경우 광섬유 직경과 유사한 크기로 쉽게 제작이 가능하기 때문에 소형 렌즈의 대안으로 충분히 활용성이 높은 광소자이다. 그림 2-5에서 보이는 결과는 광선 추적 프로그램인 Zemax를 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다 [36]. 광섬유 다발에서 광이 나오는 것을 그린 렌즈를 바로 연결하여 마치 벌크형태의 렌즈를 삽입하여 초점을 맺게 한 상황을 모사하여 시뮬레이션을 수행한 것이다. 초점면에서의 스폿을 살펴보다도 하나의 점에서 결상이 되고 초점을 가지는 것을 확인할 수 있다. 그린 렌즈는 길이가 길어서 일반적인 렌즈와는 다른 모양이지만 기능면에서 볼 때 완벽한 렌즈의 역할을 수행한다. 다양한 내시경 응용에서 소형이면서 광섬유에 친화적으로 적용이 가능한 장점을 가지기 때문에 렌즈의 기능을 수행하기 위해서 활용되는 대표적인 소형 광학소자이다.

(a)



(b)

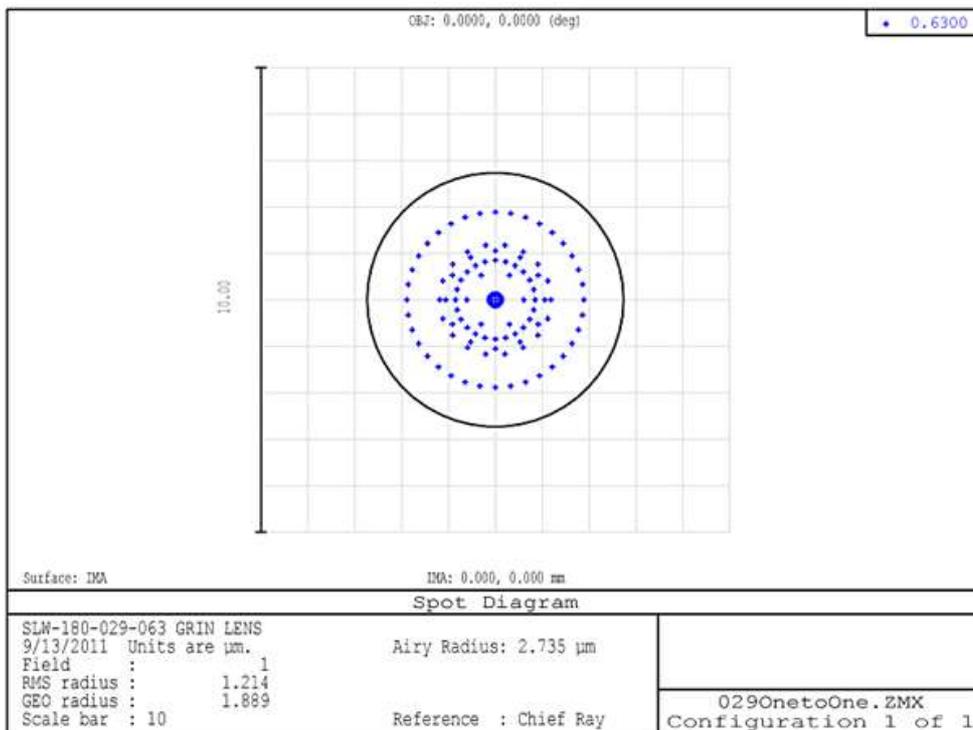


그림 2-5. 그린 렌즈를 이용한 광선 추적 시뮬레이션 수행 결과. (a) 그린 렌즈에서의 광선 진행 경로, (b) 그린 렌즈 스폿 다이어그램

그림 2-6(a)에서는 광섬유에서 방출된 광이 그린 렌즈를 통해 다른 광섬유에 입사되는 광선의 경로를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 그린 렌즈가 하나의 단일 렌즈와 동일한 효과를 보여준다. 그림 2-6(b)에서는 일반적인 두 렌즈의 효과를 두 개의 서로 다른 굴절률 분포를 가지는 그린 렌즈를 통해서 재현 가능함을 설명해 주고 있다. 그림 2-6(c)는 광섬유 다발을 그린 렌즈와 연결하는 경우 그림 2-6(d)에서 보이는 단일 코어 광섬유를 그린 렌즈에 연결한 것과는 달리 여러 위치에서 초점이 맺는 특징을 확인할 수 있다 [32].

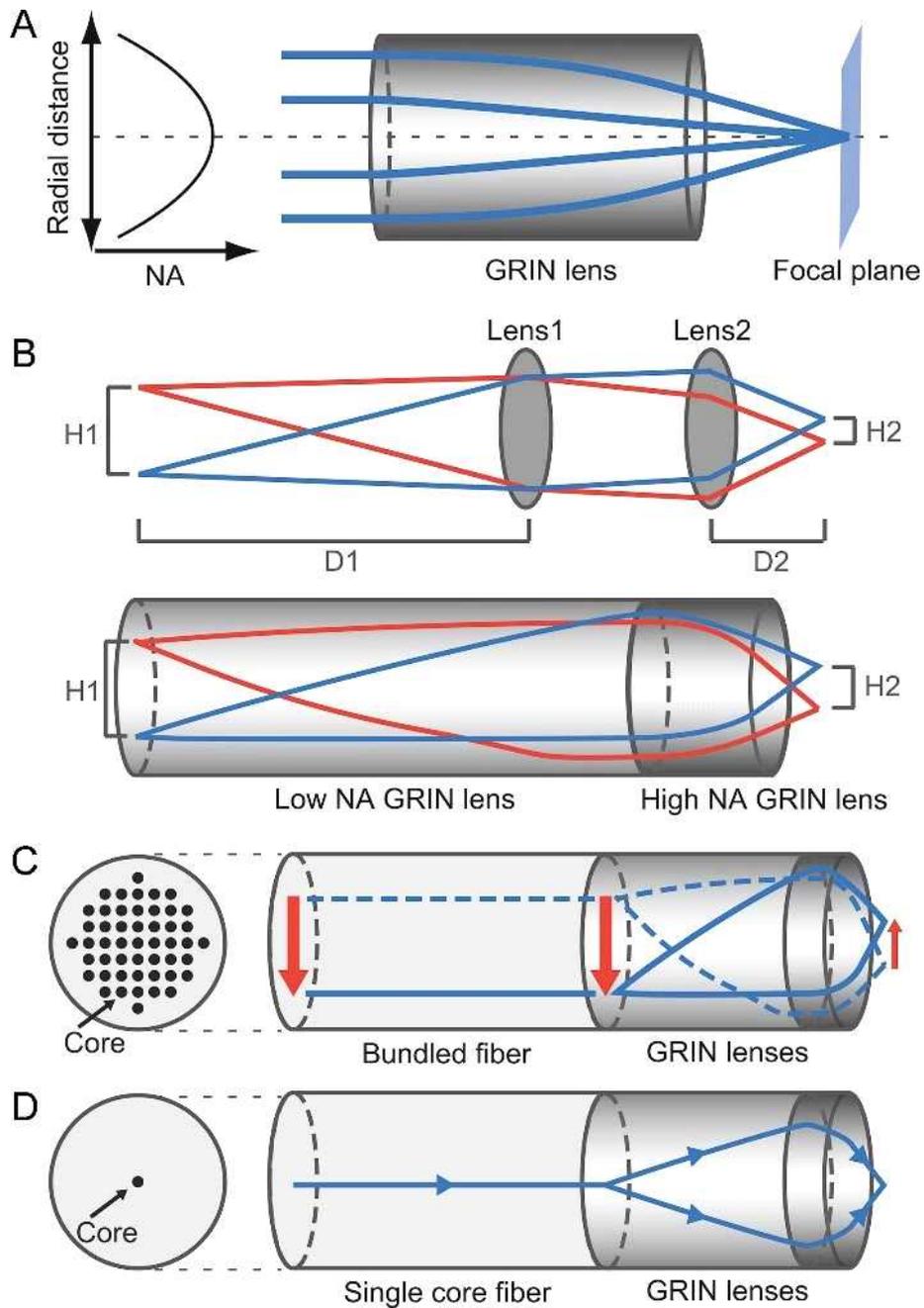


그림 2-6. 그린 렌즈 효과에 대한 개략도. (a) 그린 렌즈 굴절을 분포와 그에 따른 렌즈 효과, (b) 두 개의 렌즈와 동일한 효과를 가지는 서로 다른 두 그린 렌즈의 조합, (c) 광섬유 다발과 그린 렌즈에 의한 효과, (d) 단일 코어 광섬유와 그린 렌즈에 의한 효과

그린 렌즈를 적절하게 사용하기 위해서는 그린 렌즈의 피치(pitch)에 대한 이해가 뒷받침되어야 한다. 그린 렌즈의 길이가 광선이 렌즈를 통과할 때 하나의 정현파 주기를 완료하면 그린 렌즈는 1.0 피치를 갖는다고 말한다. 1.0 피치를 가지는 그린 렌즈는 상의 왜곡이 없는 상태가 된다. 이러한 상황은 렌즈 초점 길이의 8배에 해당하는 거리를 가지는 텔레센트릭 릴레이(telecentric relay)를 형성하기 위해 서로 떨어져있는 2개의 초점 거리만큼 떨어져 있는 연속된 4개의 얇은 렌즈가 하는 기능과 유사하다. 입사면 근처에 물체를 놓은 0.25 피치 그린 렌즈는 물체에서 한 초점 거리만큼 떨어진 단일 얇은 렌즈처럼 작동하며, 이 피치는 사용하는 광원의 파장에 따라 달라지게 되는데 이는 그림 2-7을 보면 이해하기 쉽다.

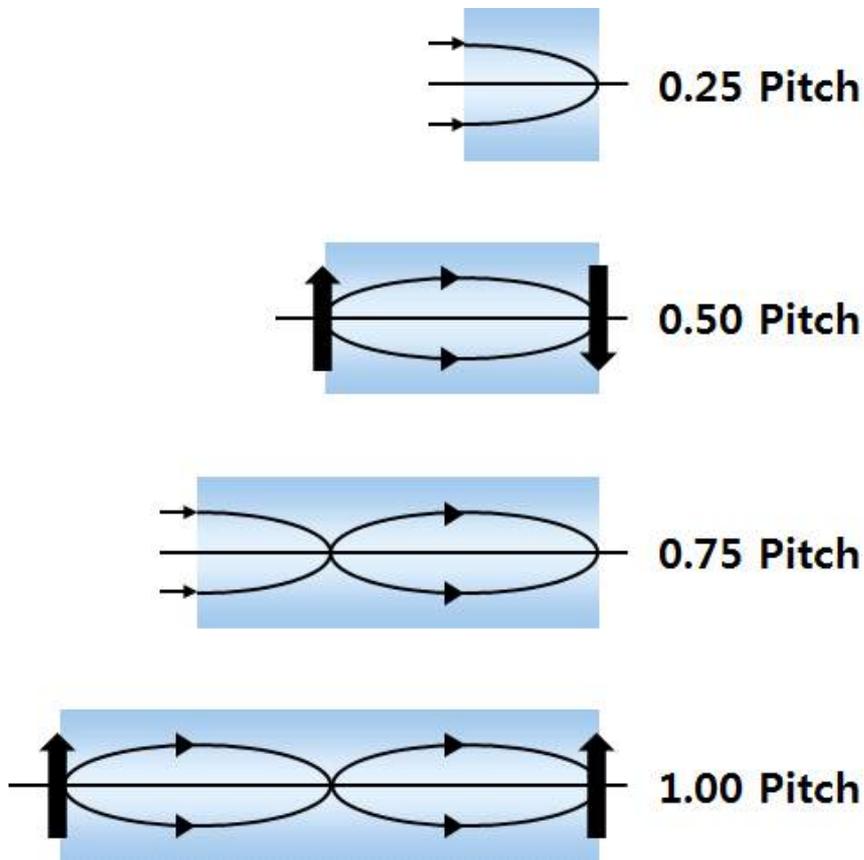


그림 2-7. 그린 렌즈의 다양한 피치별 광의 진행과 결상된 상의 차이

3. 전방 반사를 위한 원뿔형 거울

원뿔형 거울(Cone mirror)이란 원뿔 모양의 거울로 정면 반사가 아닌 측면 반사가 되는 거울을 말한다. 재질은 일반적으로 많이 쓰이는 평면거울과 같으나 거울면이 원뿔 모양으로 되어있어 원뿔의 각도에 따라 반사된 광의 진행방향이 달라진다. 크기가 다양하여 쓰이는 곳도 다양한데 최근 의학계열에서는 캡슐내시경에 많이 사용하고 있다. 그림 2-9를 통해 원뿔형 거울을 통해 보이는 원형 영상을 확인할 수 있다 [33].

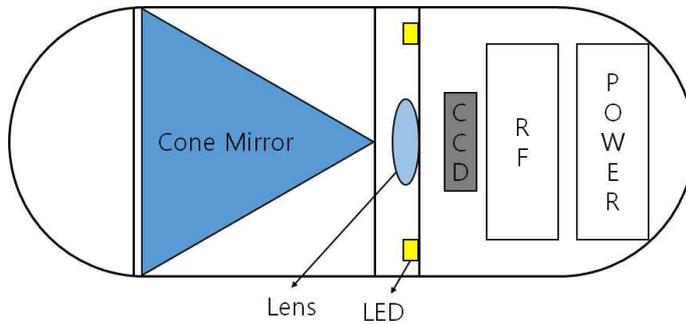


그림 2-8. 원뿔형 거울이 사용된 캡슐 내시경의 구조도



그림 2-9. 원뿔형 거울을 이용하여 촬영한 파노라마 영상

제 3 절 측면 영상의 파노라마 영상 구현

1. 영상 unwrapping을 통한 파노라마 영상 구현

파노라마는 방사선 투과 시험에서 많이 사용되어진다. 감마선원 또는 파노라마 X 선 발생장치의 주위에 다수의 시험체를 늘어놓고, 1회 조사로 동시에 촬영하는 방법이다. 단일방향 조사에 의한 촬영방법에 대한 용어로서 사용된다. 이는 전체 원둘레와 전체 입체각 조사의 촬영방법으로 크게 나누어진다. 방사선 안전관리는 단일 방향 조사에 비해 더욱 주의해야 한다. 일반적으로 감마선원을 중심으로 여러 개의 시험체를 그 두께에 따라 선원으로부터 거리를 변경하고, 같은 중심으로 같은 둘레 위에 배치하여 동시에 촬영하는 방법을 말한다. 그 밖에 관이나 작은 공 모양의 시험체 전체 원둘레 또는 전체 입체각의 용접부를 동시에 촬영하는 경우도 이 촬영방법에 포함된다.

2차원 카메라로 영상을 수광하는데 있어서 수광되는 광신호의 분포가 반사 거울의 모양에 따라서 원형으로 형성되기 때문에 측정된 광신호는 직관적으로 이해되는 사각형 형태의 평면 영상이 아니라 그림 2-10(a)과 같이 원형으로 감겨있는 형태로 왜곡되어 있는 영상이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 영상의 **unwrap** 처리 기법을 통해서 왜곡된 상태에서 그림 2-10(b)과 같은 평형 사변형 형태로 재구현된다 [32].

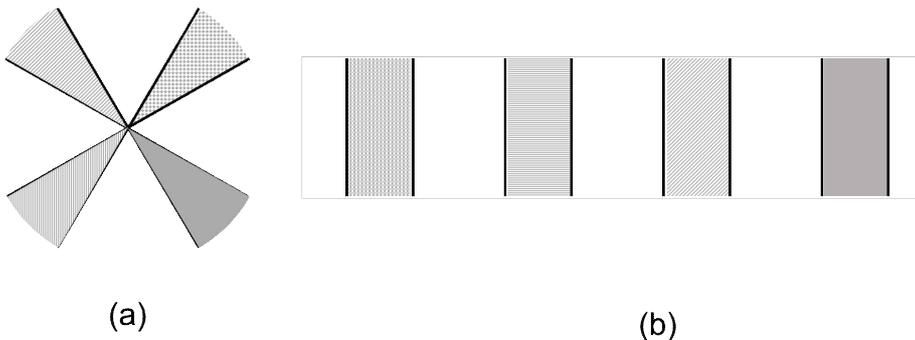


그림 2-10. (a) 원뿔형 거울에 비친 상의 모습, (b) 평면 영상으로 복원된 원래의 이미지 형태

2. 파노라마 영상 구현을 위한 좌표 변환

파노라마 영상은 거울에 의해 반사된 영상이다. 거울 주위에 위치한 가상의 원통을 고려하면 이 원통에 길이 방향으로 그어진 줄은 거울에서 반사되어 영상으로 비추어질 때 반지름의 방향을 따르게 된다. 이렇게 매핑 된 영상을 원통을 펼친 것으로 펼치는 것을 영상을 **unwrapping**하는 것이라고 부른다. 그림 2-12(a)는 내경과 외경이 각각 r 과 R 인 거울에 비친 영상을 보여준다. 이 내경과 외경 안에 영역이 **unwrapping**을 하게 되는 관심 영역이 된다. 내경 안에 영역은 실제로 원뿔형 거울의 첨두에 해당하는 부분으로 이곳에서는 평면 반사와 같은 반사가 일어나고 측면 영상이 맺히는 영역이 아니기 때문에 관심 영역이 아니다. 그림 2-12(b)는 관심 영역에 대해 펼쳐진 원통형의 파노라마 영상이다. 원통형 표면의 영상에서의 위치 $P'_o(X'_0, Y'_0)$ 는 다음의 식에 의해서 극좌표계에 $P_o(X_0, Y_0)$ 로 대응된다.

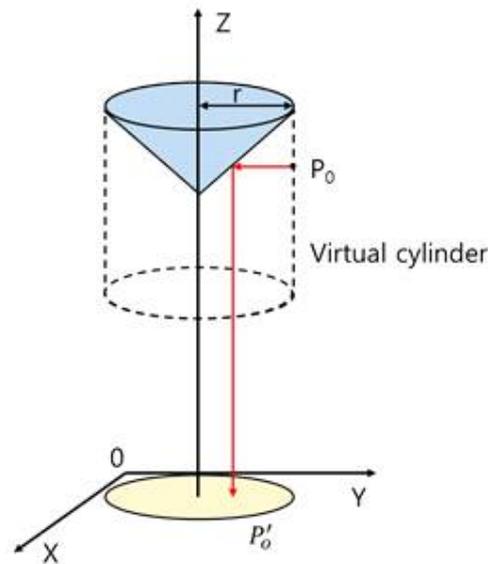


그림 2-11. 원통형 샘플 내부 좌표와 원뿔형 거울에 표면의 영상 좌표와의 매핑 관계

$$h_0 = \frac{r_m}{y_m} Y'_0 \quad (2-1)$$

$$\theta_0 = \frac{2\pi}{x_m} X'_0 \quad (2-2)$$

여기서 (x_m, y_m) 은 픽셀 단위에서의 원통형 영상의 크기를 나타낸다. r_m 은 픽셀 단위에서 원형 파노라마 영상에서 보여 지는 거울의 반지름을 나타낸다. θ_0 의 단위는 라디안이다. $x_m/y_m = 2\pi$ 인데 그 이유는 unwrapping된 영상의 바닥의 길이는 거울의 원주가 되기 때문이다. unwrapping되기 전의 극좌표에서 직사각형의 파노라마 영상으로 매핑되는 관계식은 다음과 같이 주어진다 [34].

$$X_0 = X_c + h_0 \cos \theta_0 = X_c + \frac{r_m}{y_m} Y'_0 \cos \frac{2\pi}{x_m} X'_0 \quad (2-3)$$

$$Y_0 = Y_c + h_0 \sin \theta_0 = Y_c + \frac{r_m}{y_m} Y'_0 \sin \frac{2\pi}{x_m} X'_0 \quad (2-4)$$

이 관계식으로부터 원형으로 측정되는 거울 영상의 각각의 픽셀이 평면의 파노라마 영상의 어느 픽셀에 대응되는지를 계산할 수 있다. 파노라마 영상이 측정되는 영상에서 내경 부근과 외경 부분의 픽셀의 차이를 가지기 때문에 보간법을 통해서 픽셀의 수를 증가시켜 줄 필요가 있다.

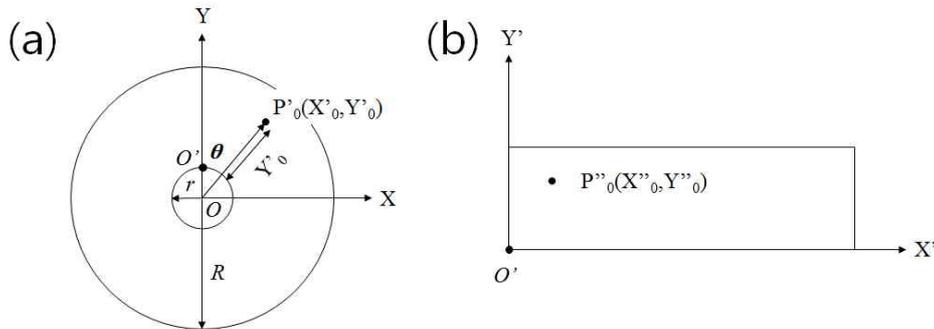


그림 2-12. 원형 영상을 평면 파노라마 영상으로 매핑하기 위한 좌표. (a) 원형 영상에서의 좌표, (b) 파노라마 영상에서 대응되는 좌표

제 3 장 실 험

제 1 절 광섬유 다발만을 이용한 평면 영상 구현

본 실험에서 사용한 광원은 LED(light emitting diode)이다. 그림 3-1과 같이 LED에서 퍼져 나온 광이 평면으로 된 종이샘플을 비추어 주고, 이 종이샘플은 초점 렌즈(Focal length : 60 mm, 400 - 700 nm, AC254-060-A-ML, THORLABS), 이미징 렌즈(Focal length : 60 mm, 400 - 700 nm, AC254-060-A-ML, THORLABS) 그리고 광섬유 다발(Optical fiber bundle, N. A : 0.55, Number of Fibers : 50419, Fiber Diameter : 12 μm , Outer Diameter : 3.2 mm, Length : 3 inches, #53-840, Edmund Optics)을 지나 멀티캠(Full HD 1080P, Image sensor : Sony 1/2.8" progressive CMOS, 2Megapixel, Resolution : 1920(H) * 1080(V), Multi Cam, WINUS)을 통해 영상이 구현된다. 이 때 광섬유 다발은 실험기구에 고정시켰다.

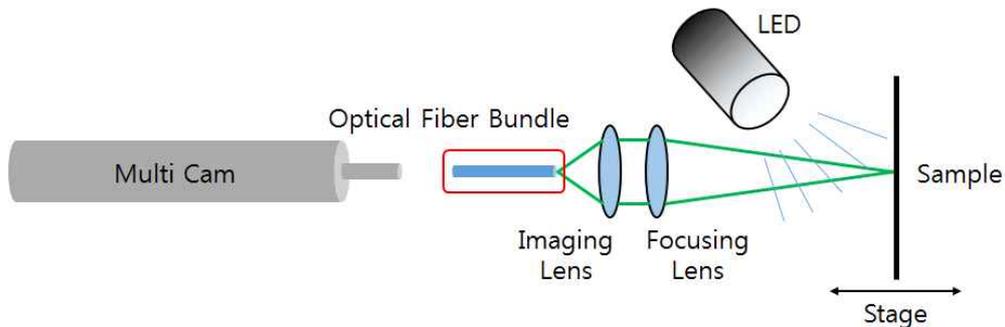


그림 3-1. 광섬유 다발과 멀티캠을 이용하여 영상을 구현하기 위한 개략도

실험을 진행하기에 앞서 광섬유 다발의 내부구조를 보기 위해 LED를 광섬유 다발의 뒤에서 비추어주었다. 그림 3-2에서 볼 수 있듯이 굉장히 많은 양의 소형 광섬유들이 광섬유 다발내부에 자리 잡고 있음을 확인할 수 있었다.

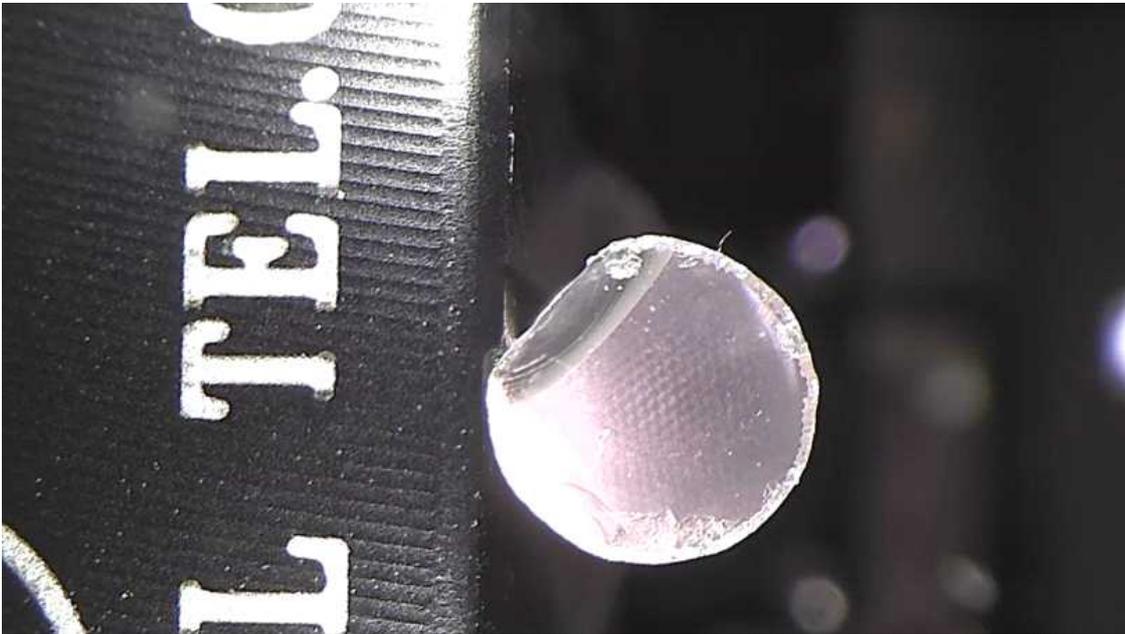


그림 3-2. 사용한 광섬유 다발의 단면 모습

그림 3-3(a)의 경우 알파벳 대문자 C, E, S에서 E와 S는 초점이 잡혔으나 C의 형상이 드러나지 않았으며, 광섬유 다발에 먼지 때문에 영상이 흐릿해 보였다. 이에 따라 광섬유 다발을 초음파 세척기를 이용하여 세척을 한 후 다시 세팅하여 실험을 진행해 나갔다. 그림 3-3(b)의 경우 C, E, S 모두 전체적으로 보이긴 하나 여전히 C의 형상이 제대로 드러나지 않았으며, 사용하는 카메라가 자동으로 초점이 조절되어 광섬유 다발의 끝이 아닌 엉뚱한 곳에 초점이 잡히는 단점이 있었다. 이에 따라 광섬유 다발의 끝과 광섬유 다발을 고정해주는 광학기구의 끝을 최대한 같게 하여 초점 잡기 용이하도록 바꾸어 세팅하여 실험을 진행해 나갔다. 또한 광섬유 다발과 이미징 렌즈, 초점 렌즈, 샘플의 중심이 정확히 맞지 않아 샘플의 모든 부분이 제대로 보이지 않음을 확인하였다. 그림 3-3(c)의 경우에는 C, E, S 모두 전체적으로 보이긴 하나 샘플영상의 선명도가 떨어졌다. 이는 더 이상 멀티캠에서 바로 보이는 앞단의 문제가 아닌 렌즈간의 초점거리의 문제로 판단되어져서 광섬유 다발과 샘플 사이에 있는 두 렌즈사이의 거리

를 조절하며 초점을 맞추었다. 그림 3-3(d)는 이전에 나온 문제점들이 어느 정도 해결되어 샘플에 새겨진 알파벳 대문자를 선명하게 볼 수 있었다.

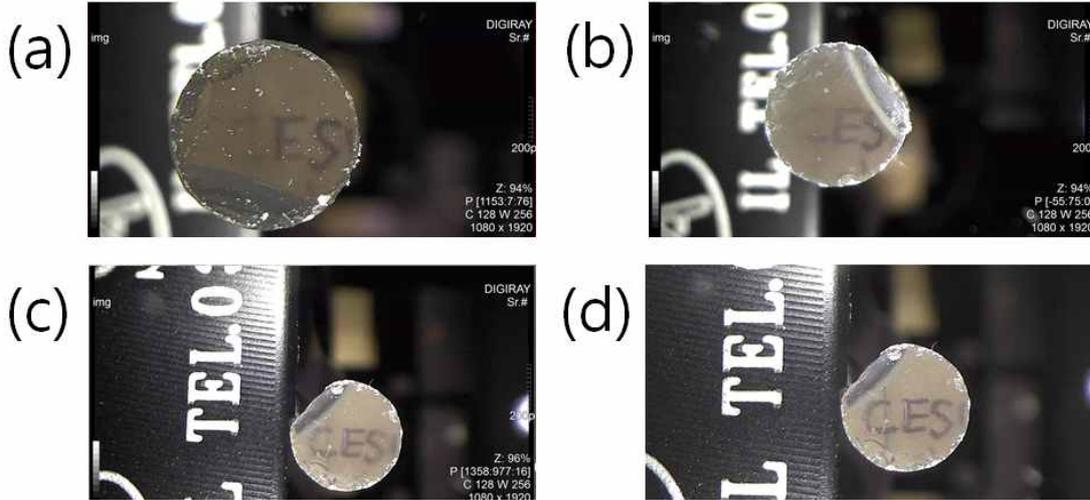


그림 3-3. 광섬유 다발을 이용하여 C, E, S가 쓰인 종이샘플을 구현한 영상. (a) C, E, S 중 E, S만 초점이 잡힌 영상, (b) C, E, S 중 E, S는 초점이 잡히고 C는 초점이 잘 맞지 않은 영상, (c) C, E, S 모두 초점이 잡힌 영상, (d) C, E, S 모두 초점이 잘 맞은 영상

두 번째 실험에서는 그림 3-4에서 볼 수 있듯 샘플에 써진 글자 수를 늘려 전체적으로 크기를 좀 더 크게 만들고 이전의 실험방법과 동일하게 하여 실험을 진행하였으며, 이때 사용한 글자 샘플은 그림 3-4에서 확인할 수 있다. 이전에 실험했던 실험결과와 유사하게 측정되긴 했으나 실험을 진행하는 동안 멀티캠의 초점이 자동으로 바뀌어 원하는 위치에 초점을 잡기에 어려운 단점이 있었다. 또한 광섬유 다발을 일반 평평한 실험도구에 테이프로 고정하다보니 쉽게 흔들리는 문제점이 발생하였다. 이는 광섬유 다발을 고정하는 방법을 바꾸면 해결 가능할 것이라고 판단되며, 샘플의 선명도가 떨어진 것은 광섬유 다발을 새로 고정하는 과정에서 렌즈와의 거리가 달라진 것으로 판

단된다. 이는 광섬유 다발을 완전히 고정시킨 뒤 렌즈사이의 거리를 조정하는 등 정밀한 광정렬을 하게 되면 영상이 향상될 것으로 사료된다.

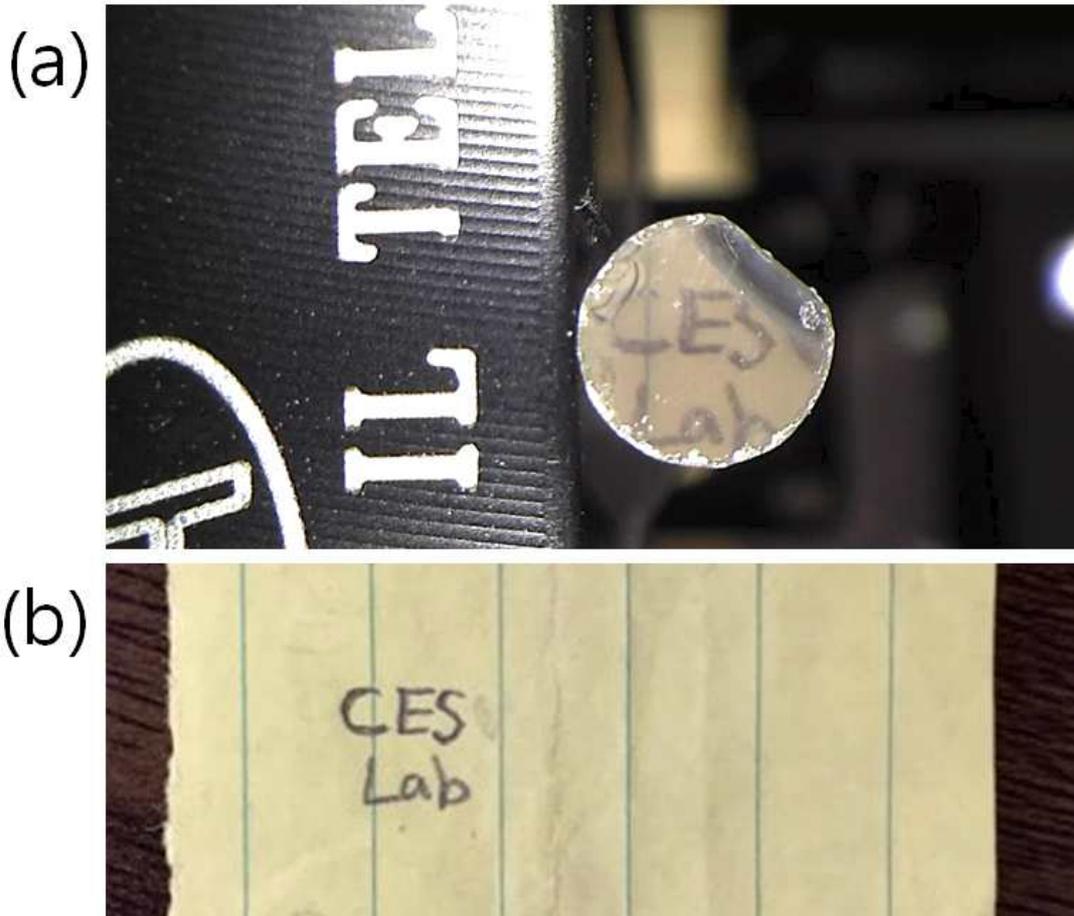


그림 3-4. (a) 광섬유 다발을 이용하여 CES Lab이 쓰인 종이샘플을 구현한 영상, (b) 사용된 샘플

세 번째 실험에서도 이전의 실험과 실험방법은 동일하나 광섬유 다발을 테이프를 이용하여 평평한 실험도구에 붙여 고정시키던 방식이 아닌 다양한 사이즈의 렌즈를 고정하는 도구에 고정시켜 실험을 진행하였다. 이번 실험에서는 기존에 사용하던 종이샘플이 아닌 0.1 mm 단위의 눈금이 새겨진 유리 샘플(Micrometer, 05A01040, Pyser optics, 간격 : 0.1 mm, 총 길이 : 10 mm)을 사용하여 진행하였다. 종이가 아닌 투명한 유리에 새겨진 샘플이기 때문에 뒤에 배경이 겹치면 샘플이 보이지 않는 단점이 있어 샘플의 뒤에 하얀색의 종이를 붙여 실험을 진행하였다. 그림 3-5에서 알 수 있듯 광섬유 다발을 통해 본 샘플은 약 6 mm 직경에 해당하는 넓이 정도였으며, 사용하였던 광섬유 다발의 표면 상태가 깨끗하였다면 대략 9 ~ 10 mm 정도 직경에 해당하는 면적에 대해서 샘플의 모습을 선명하게 볼 수 있을 것으로 보이며, 그림 3-5(a)는 실험에서 사용된 광섬유 다발의 단면 모습과 그림 3-5(b)는 눈금을 가지는 샘플을 보여준다.

(a)



(b)



그림 3-5. (a) 광섬유 다발을 이용하여 0.1 mm 단위의 눈금이 새겨진 유리 샘플을 구현한 영상, (b) 0.1 mm 단위의 눈금이 새겨진 유리샘플

제 2 절 원뿔형 거울을 이용한 영상 구현

본 실험에서 사용한 광원은 이 전 실험과 같은 LED를 이용하였다. 그림 3-6과 같이 LED에서 퍼져 나온 광이 원통모양으로 만든 종이샘플을 비추어주고, 이 샘플이 원뿔형 거울(cone mirror, Diameter : 3.0 mm, Length : 3.0 mm, Core Angle : 90°, 400 - 700 nm, #45-938, Edmund Optics)에 반사되어 초점렌즈(Focal length : 100 mm, 400 - 700 nm, AC254-100-A-ML, THORLABS), 이미징 렌즈(Focal length : 60 mm, 400 - 700 nm, AC254-060-A-ML, THORLABS)를 지나 CMOS(complementary metal oxide semiconductor) 카메라(Monochrome Camera, Pixel (H*V) : 1440*1080, Pixel Size (H*V(μ m)) : 3.45*3.45, DMK37BUX273, THE IMAGING SOURCE)를 통해 영상으로 구현되었다.

첫 번째 실험에서는 가로 세로 간격이 약 2.2 mm인 좁고 일정한 대각선 격자무늬가 새겨진 종이샘플을 이용하여 실험을 진행하였다. 이 때 종이샘플의 일부를 잘라 샘플에 최대한 많은 외부 광이 들어갈 수 있도록 하였다. 그림 3-7(a)은 원뿔형 거울의 중심과 카메라의 중심이 맞지 않고 광이 제대로 입사되지 않아 샘플이 어둡고 샘플의 형태가 제대로 보이지 않으며, 일부분만 초점이 잡혔다. 그림 3-7(b)은 원뿔형 거울의 중심과 카메라의 중심이 잘 맞도록 조절하고, 입사광이 최대한 잘 들어갈 수 있도록 LED의 각도를 조절하였다. 그림 3-7(a)과 마찬가지로 어둡긴 하나 상이 보이며, 원뿔형 거울의 바깥쪽 부분을 보게 되면 3-7(a)에 비해 초점이 잡혀있는 것을 볼 수 있다. 사용된 정사각형의 격자무늬 종이샘플은 영상에서 원뿔형 거울의 각도에 의해 길고 좁게 보였다. 이는 격자가 맞물리는 부분의 각이 제대로 보이지 않아 샘플의 초점이 맞지 않는 것으로 판단된다.

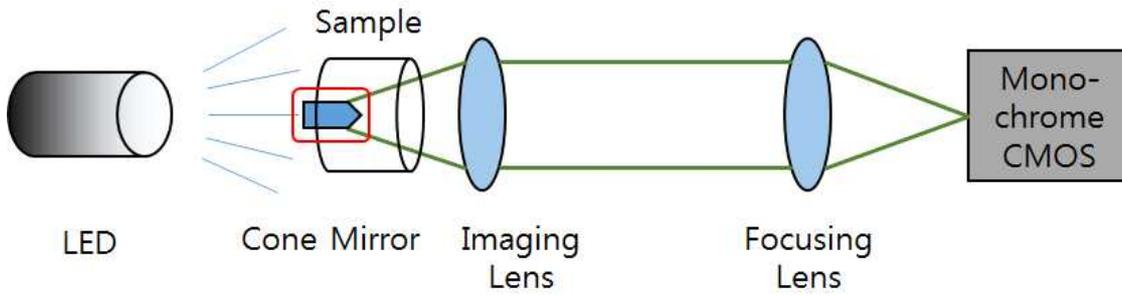


그림 3-6. 원뿔형 거울을 이용한 영상 구현을 위한 개략도

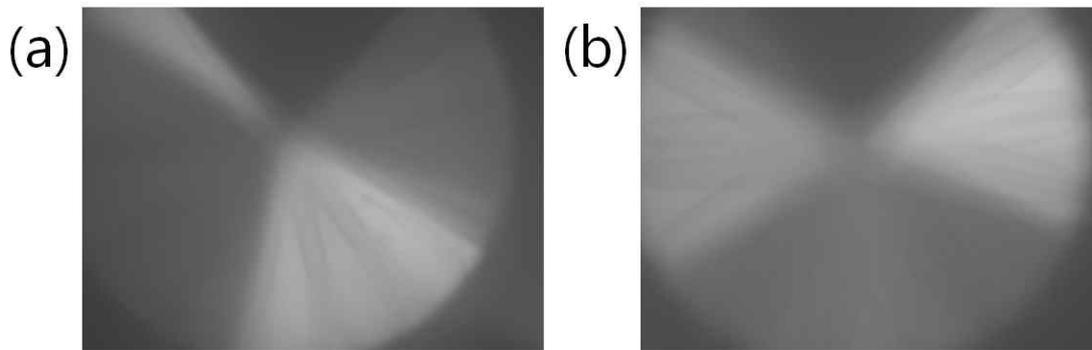


그림 3-7. 일부가 잘린 좁고 일정한 간격의 대각선 격자무늬. (a) 광이 들어가는 각도가 틀어지고 초점이 맞지 않은 상태, (b) 광이 들어가는 각도가 잘 맞고 초점이 맞은 상태

두 번째 실험에서는 앞에서 사용하던 대각선의 격자무늬는 초점이 잘 잡혀있음에도 불구하고 격자가 맞물리는 부분의 각이 제대로 보이지 않아 샘플의 초점이 맞지 않는 단점을 해결하기 위하여 가로 간격이 약 10 mm, 세로 간격이 약 3 mm인 폭이 넓고 일정한 간격의 직사각형 격자무늬의 종이샘플을 사용하였다. 이전의 실험과 마찬가지로 종이샘플의 일부를 잘라 샘플에 최대한 많은 외부 광이 들어갈 수 있도록 세팅하였으며, 실험과정은 이전의 실험과 동일하게 진행되었다. 그림 3-8(a)에서 원뿔형 거울의 중심과 끝의 초점은 맞지 않아 영상이 흐려졌으며, 중간 부분은 초점이 잘 맞아 선명한 격자무늬를 볼 수 있었다. 또한 광의 방향에 의해 영상이 전체적으로 어두워 보이는 것도 확인할 수 있었다. 그림 3-8(b)은 입사하는 광의 각도와 두 렌즈 사이의 초점거리를 조절하였으며, 광의 각도에 따라 밝기와 전체적인 초점이 달라짐을 확인하였다. 그림 3-8(c)은 광이 들어가는 각도가 완전히 수평이 되어 원뿔형 거울의 중심에도 달한 광이 반사되었다. 영상을 보면 이전에 비해 선이 진해지긴 했으나 여전히 일부만 초점이 잡히는 문제는 해결되지 않았다. 위의 세 가지 영상을 통해 외부로부터 광을 받기 위해 잘라낸 부분은 오히려 어둡게 보이고, 원통형으로 말아 놓은 종이샘플의 크기와 원뿔형 거울의 지름, 그리고 중심각에 의해 동시에 모든 면의 초점을 잡을 수 없음을 알 수 있었다.

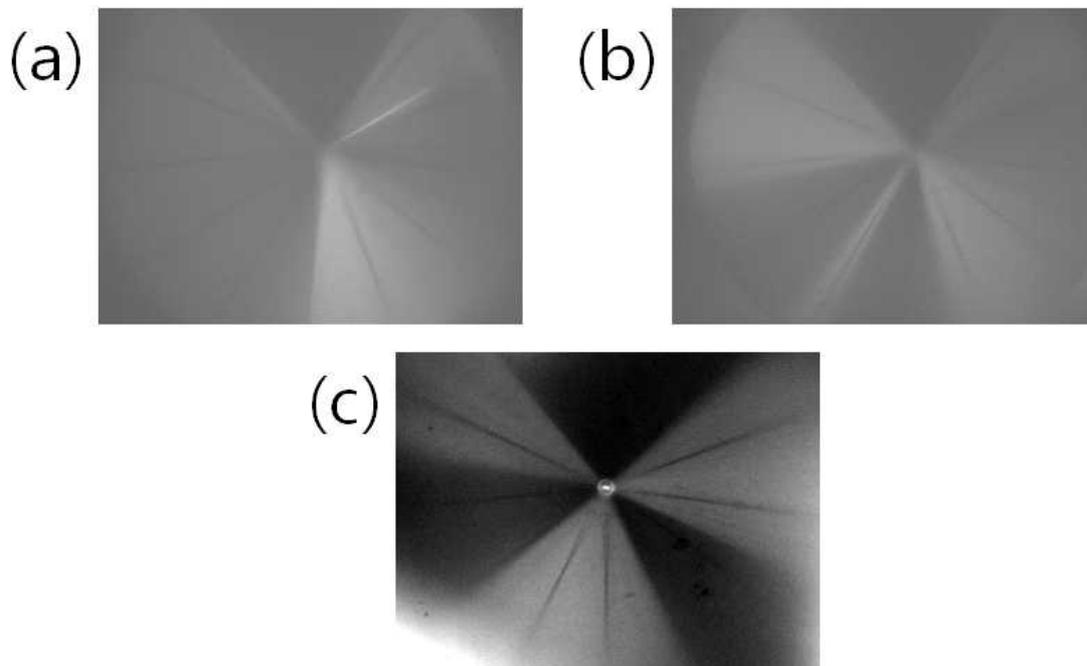


그림 3-8. 일부가 잘린 폭이 넓고 일정한 간격의 일자무늬. (a) 광이 꺾여 들어가 초점이 맞지 않음, (b) 입사광의 각도를 조절함, (c) 광이 들어가는 각도가 수평이 됨

세 번째 실험에서는 초점이 어느 정도의 간격까지 영상으로 측정이 가능한지를 확인하기 위하여 가로 세로 간격이 약 2.2 mm인 좁은 간격의 격자무늬로 교체하여 실험을 진행하였으며, 실험 방법은 이전의 실험과 동일하게 진행되었다. 그림 3-9(a)에서와 같이 초점이 일부분만 잡히는 문제는 해결하지 못했지만 좁은 간격에서도 초점이 어느 정도 잡히는 것을 확인하였으며, 외부에서 들어오는 광을 차단하고 LED광원만을 이용하여 영상을 보았을 경우에도 밝기가 어둡지 않음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 내시경으로써의 가능성을 확인할 수 있었다. 실험에서 사용되었던 샘플은 그림 3-9(b)를 통해 확인할 수 있다.

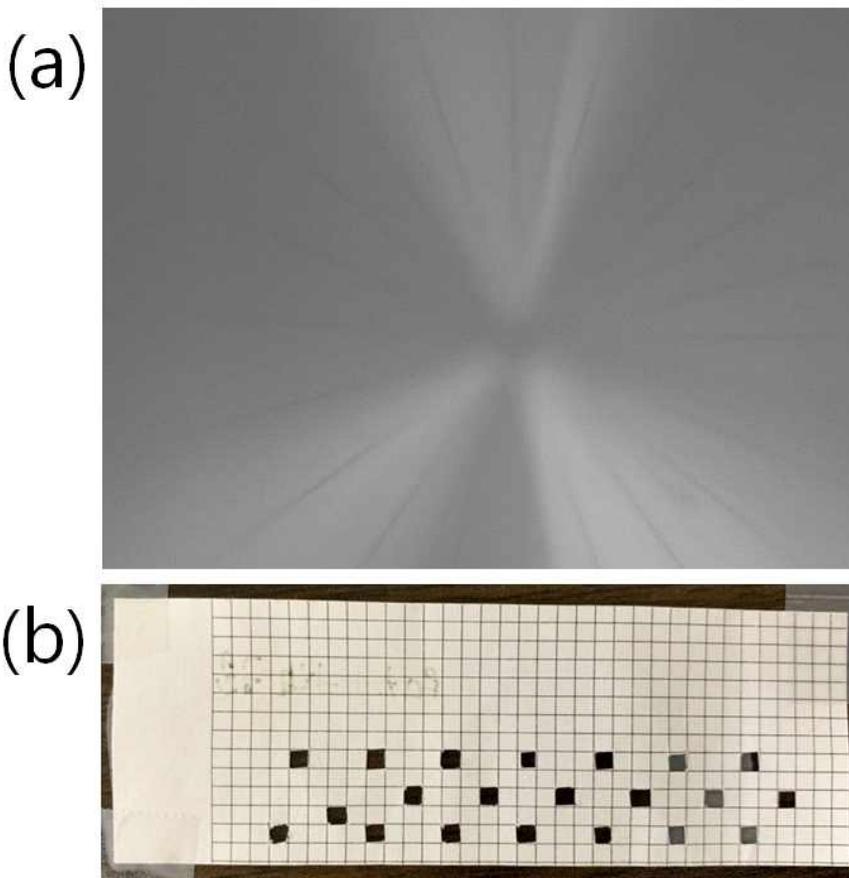


그림 3-9. (a) 원뿔형 거울에 반사된 좁고 일정한 간격의 격자무늬, (b) 좁고 일정한 간격의 격자무늬 샘플

제 3 절 이미지 unwrapping을 통한 원통 내부의 표면 영상 구현

그림 3-10과 같이 LED에서 퍼져 나온 광이 원통모양으로 만들어진 종이샘플을 뒤에서 비추어주고, 이 샘플이 원뿔형 거울(cone mirror, Diameter : 10.0 mm, Length : 10.0 mm, Core Angle : 90°, 400 - 700 nm, #45-939, Edmund Optics)에 반사되어 초점렌즈, 이미징 렌즈를 지나 CMOS 카메라를 통해 영상으로 구현되었다. 이렇게 구현된 원뿔형 거울의 원형 영상은 랩뷰 프로그램을 통해 평면 영상으로 재구현되었다.

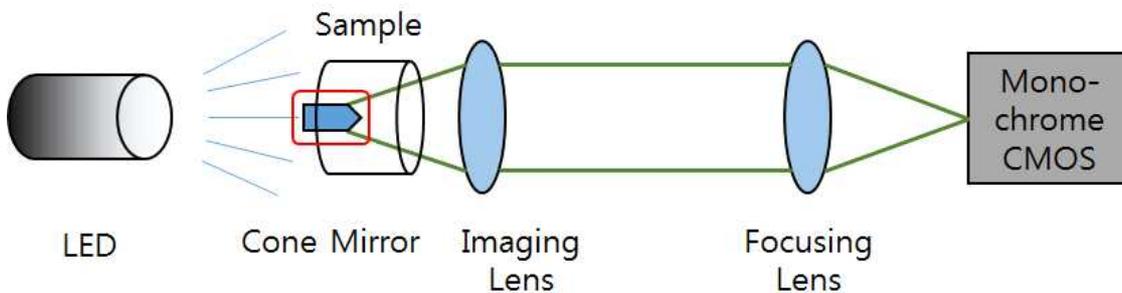


그림 3-10. LED를 종이샘플의 뒤에서 비추었을 때 평면 영상을 재구현하기 위한 개략도

그림 3-11(a)에서 알파벳 대문자가 순서대로 쓰여 있는 것을 확인할 수 있으며, 샘플의 중심과 원뿔형 거울의 중심의 위치가 맞지 않아 실제 랩뷰 프로그램을 통해 재구현된 영상이 왜곡되어 보이는 것을 확인할 수 있으나, 광이 원뿔형 거울의 일부에 심하게 반사되어 영상의 일부가 전혀 보이지 않았다. 사진의 위쪽을 보면 알 수 있듯 여전히 초점이 잡히지 않는 부분이 있었다. 이는 LED를 샘플의 뒤에서 비추어 주어 원뿔형 거울을 잡아주는 기구의 그림자가 생겨 전체적으로 영상을 흐리게 만들고 이에 따라 초점이 제대로 잡히지 않아 생긴 현상이며 이를 해결하면 영상이 선명해질 것으로 보인다. 실험에서 사용되었던 샘플은 그림 3-11(b)를 통해 확인할 수 있다.



그림 3-11. (a) LED를 알파벳 대문자가 쓰인 종이샘플의 뒤에서 비추었을 때 랩뷰 프로그램을 통해 재구현된 평면 영상, (b) 알파벳 대문자가 쓰인 종이 샘플

그림 3-12와 같이 LED에서 퍼져 나온 광이 원통모양으로 만들어진 종이샘플을 대각선으로 비추어 주고, 이 샘플이 원뿔형 거울에 반사되어 초점렌즈, 이미징 렌즈를 지나 CMOS 카메라를 통해 영상으로 구현되었다. 이렇게 구현된 원뿔형 거울의 영상은 랩뷰 프로그램을 통해 평면영상으로 재구현되었다.

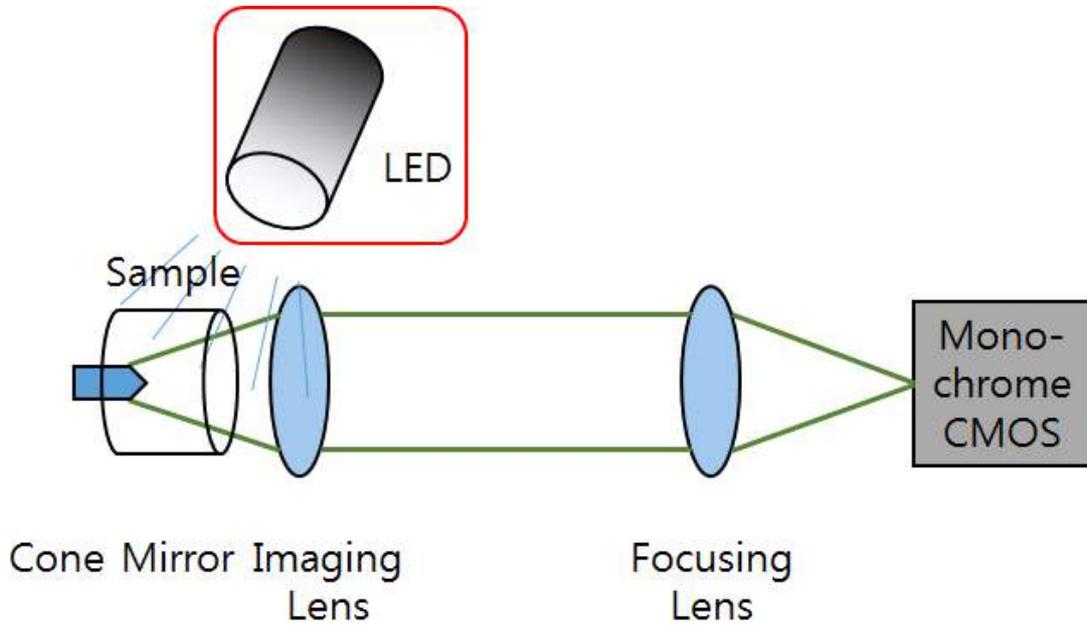


그림 3-12. LED를 종이 샘플의 대각선 방향에서 비추었을 때 측면 평면 영상을 재구현하기 위한 개략도

그림 3-13(a)에서 쓰인 종이샘플은 알파벳 대문자가 순서대로 쓰여 있으며, LED를 종이샘플의 대각선에서 비추어 주어 영상으로 보았을 때 샘플의 부분별로 밝기가 다르게 나타났다. 밝기의 차이에 의해 초점이 제대로 잡히지 않았으나 이전보다 영상이 깨끗해지고 글씨가 선명하게 보임을 확인할 수 있었다. 그림 3-13(b)에서 쓰인 종이샘플은 숫자가 순서대로 쓰여 있으며, LED를 종이샘플의 대각선에서 비추어 주어 영상으로 보았을 때 샘플의 부분별로 밝기가 다르게 나타났다. 그림 3-13(c)에서는 구멍이 뚫려 단차가 생길 경우 영상에서 어떻게 보이는지 확인해보기 위하여 가로 세로 간격이 약 2.2 mm인 격자무늬에 작은 구멍을 여러 개 뚫어 실험을 진행해 보았다. 실험에서 사용한 샘플은 각각 그림 3-14를 통해 확인할 수 있다.

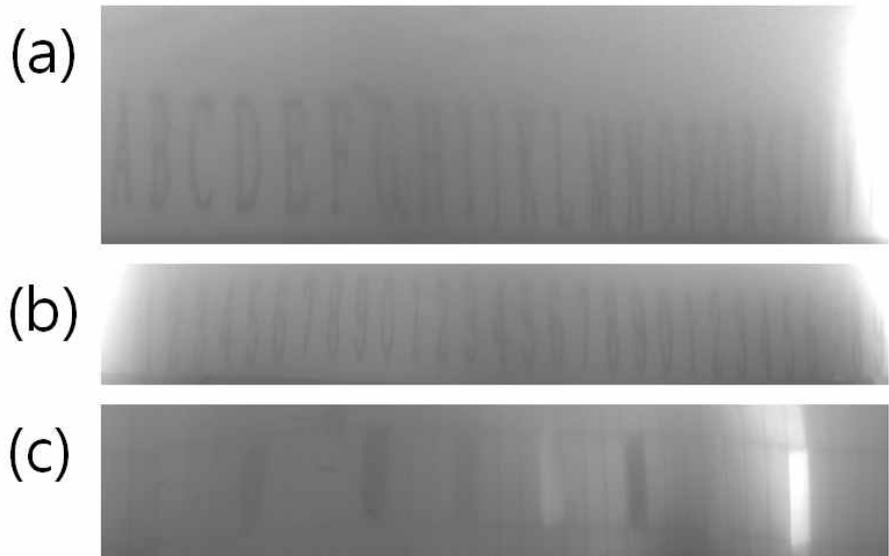


그림 3-13. LED를 종이샘플의 대각선에서 비추어 주고, 랩뷰 프로그램을 통해 재구현 된 평면 영상. (a) 알파벳 대문자가 쓰여진 종이샘플, (b) 숫자가 쓰여진 종이샘플, (c) 구멍이 뚫린 격자모양의 종이샘플

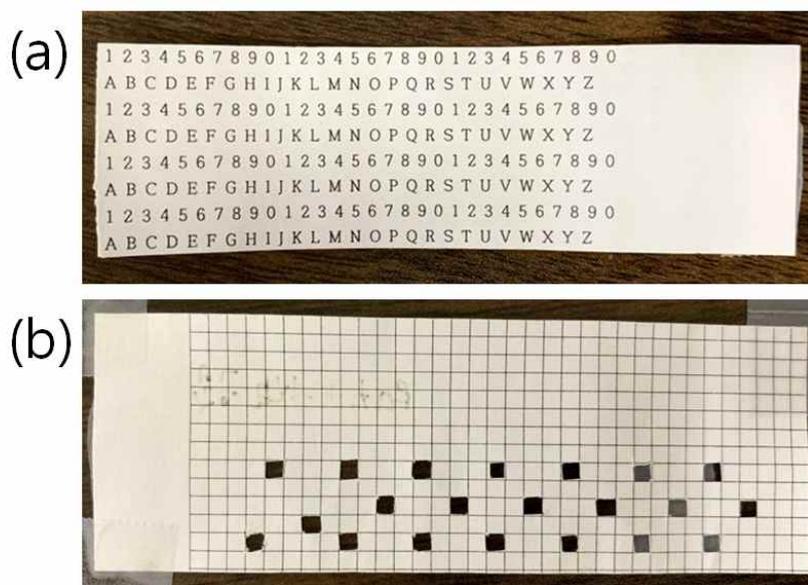


그림 3-14. (a) 알파벳 대문자와 숫자가 쓰여진 종이샘플, (b) 좁고 일정한 간격의 구멍이 뚫린 격자무늬 샘플 중 아랫부분

실제 내시경 사용 시 장기 내부에 광을 직접 비추어줄 수 없으므로 레이저를 이용하여 내부 영상을 획득하였다. 본 실험에서 사용한 광원은 pigtailed He-Ne laser(max out power : 80 mW, max threshold current : 90 mA, 632 - 643 nm, LP637-SF70, THORLABS)이다. 그림 3-15와 같이 광원에서 나온 광은 콜리메이터(collimator, $f=18.24$ mm, N.A=0.15, 633 nm, F280FC-B, THORLABS)를 통과한 뒤, 광분배기(beam splitter, 50:50, 400 - 700 nm, CCM1-BS013/M, THORLABS)를 지나 원뿔형 거울에 반사되어 원통구조의 샘플 내부를 비추었다. 광을 받은 샘플의 내부는 다시 원뿔형 거울에 반사되어 광분배기, 초점렌즈(Focal length : 200 mm, 400 - 700 nm, AC254-200-A-ML, THORLABS), 이미징렌즈(Focal length : 30 mm, 400 - 700 nm, AC254-030-A-ML, THORLABS)를 지나 CMOS 카메라를 통해 영상으로 구현되었다.

그림 3-16을 보면 광분배기의 내부에서 간섭이 일어남과 동시에 원뿔형 거울을 맞고 나온 광에 의해 원뿔형 거울에 반사된 종이샘플의 영상이 보이지 않았다. 광량을 조절해보아도 간섭무늬에 의해 영상이 보이지 않아 새로운 방법을 이용하기로 하였다.

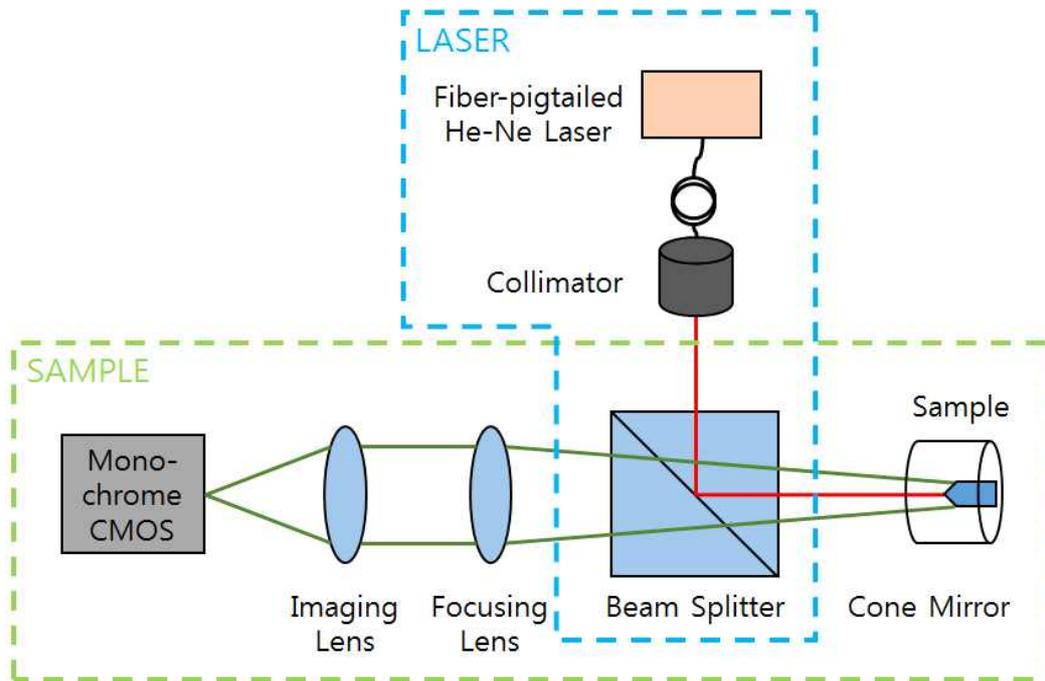


그림 3-15. 광원단과 샘플단의 각도가 90도일 때의 개략도

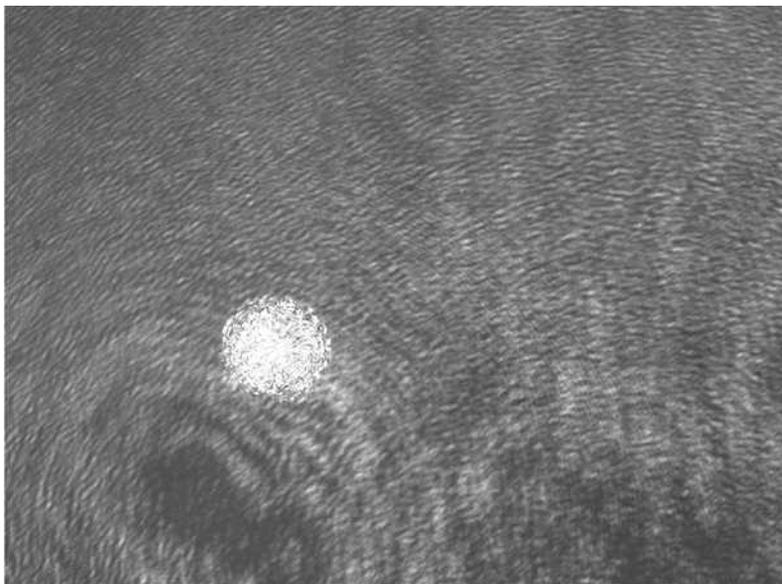


그림 3-16. 광원단과 샘플단의 각도가 90도일 때 보이는 원뿔형 거울 영상

이전 실험의 문제점인 광분배기 내의 간섭무늬를 없애기 위해 광원단의 각도를 다르게 하여 광을 조영해보았다. 본 실험에서 사용한 광원은 pigtailed He-Ne 레이저이며, 그림 3-17과 같이 콜리메이터를 통과한 뒤, 광분배기를 지나 원뿔형 거울에 반사되어 원통구조의 샘플 내부를 비추었다. 광을 받은 샘플의 내부는 다시 원뿔형 거울에 반사되어 광분배기, 초점렌즈, 이미징 렌즈를 지나 CMOS카메라를 통해 영상으로 구현되었다. 이렇게 구현된 원뿔형 거울의 원형 영상은 랩뷰 프로그램을 통해 평면 영상으로 재구현되었다. 이 때 광원단의 각도는 광분배기와 샘플단 입사 각도의 2배로 조정하여 입사각과 반사각의 각도를 맞추었다.

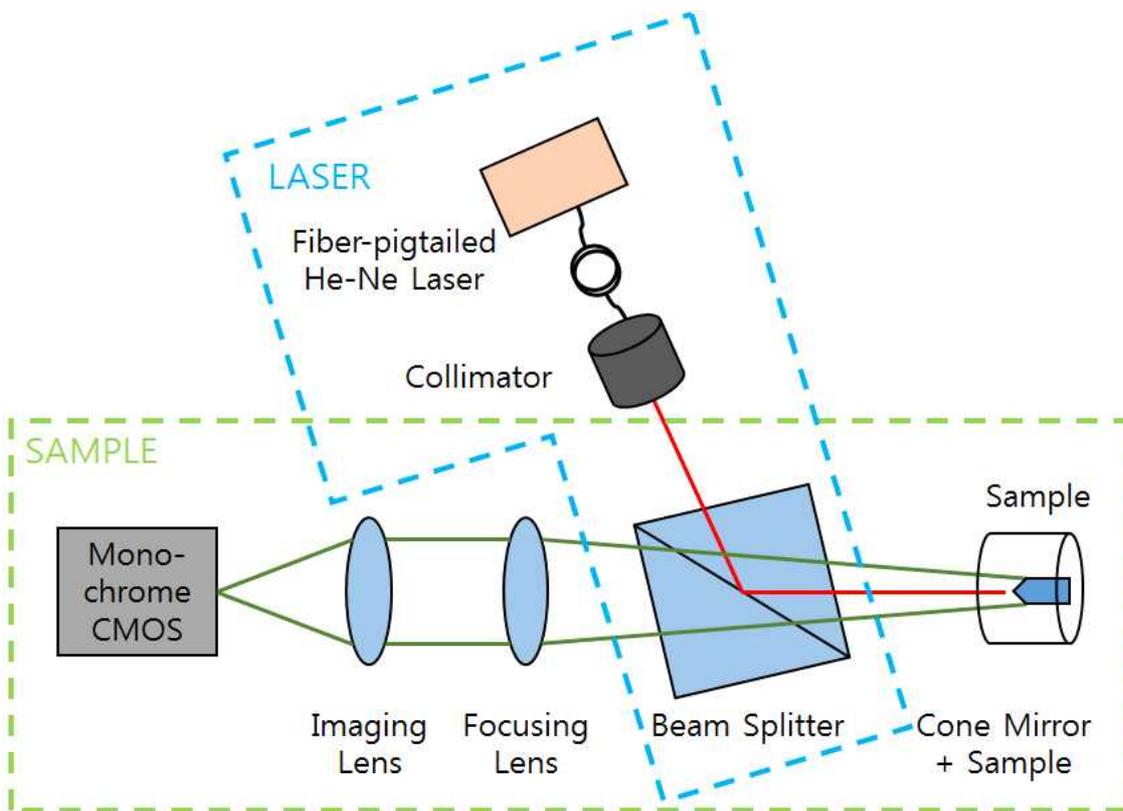


그림 3-17. 광분배기 반사광을 줄이기 위한 광정렬 개략도

이전 실험의 문제점이었던 광분배기 내에서 생긴 간섭무늬에 의해 원뿔형 거울의 영상이 보이지 않는 부분은 그림 3-18(a)에서와 같이 해결되었으나, 전체적으로 영상의 초점이 맞지 않으며, 원뿔형 거울의 중심에 집결되는 광의 크기가 커 원뿔형 거울 영상의 일부를 전혀 볼 수 없다는 문제점이 있었다. 그림 3-18(b)는 그림 3-18(a)에 비해 원뿔형 거울의 중심에 집결되는 광의 크기가 작아졌으며, 원뿔형 거울의 왼쪽은 광을 받아 초점이 잘 맞아 영상이 선명해짐을 확인할 수 있었으나, 오른쪽에는 광을 전혀 받지 않아 샘플 영상이 전혀 보이지 않는 문제점이 있었다. 그림 3-18(c)은 광이 전체적으로 퍼져서 모든 위치의 샘플 영상을 볼 수 있었다. 위 실험에서 공통된 문제점은 콜리메이터에서 나오는 광의 지름이 원뿔형 거울에 비해 작아 원뿔형 거울의 모든 면을 커버하지 못하고, 원뿔형 거울의 중심인 광이 집결된 부분에서의 반사가 심해 영상의 선명도가 떨어짐을 확인할 수 있었으며, 초점 잡는 위치에 따라 원뿔형 거울의 중심에 집결된 광의 범위가 달라지는 것도 확인할 수 있었다. 실험에서 사용된 종이샘플은 간격이 좁고 일정한 격자무늬였는데, 이는 그림 3-19를 통해 확인할 수 있다.

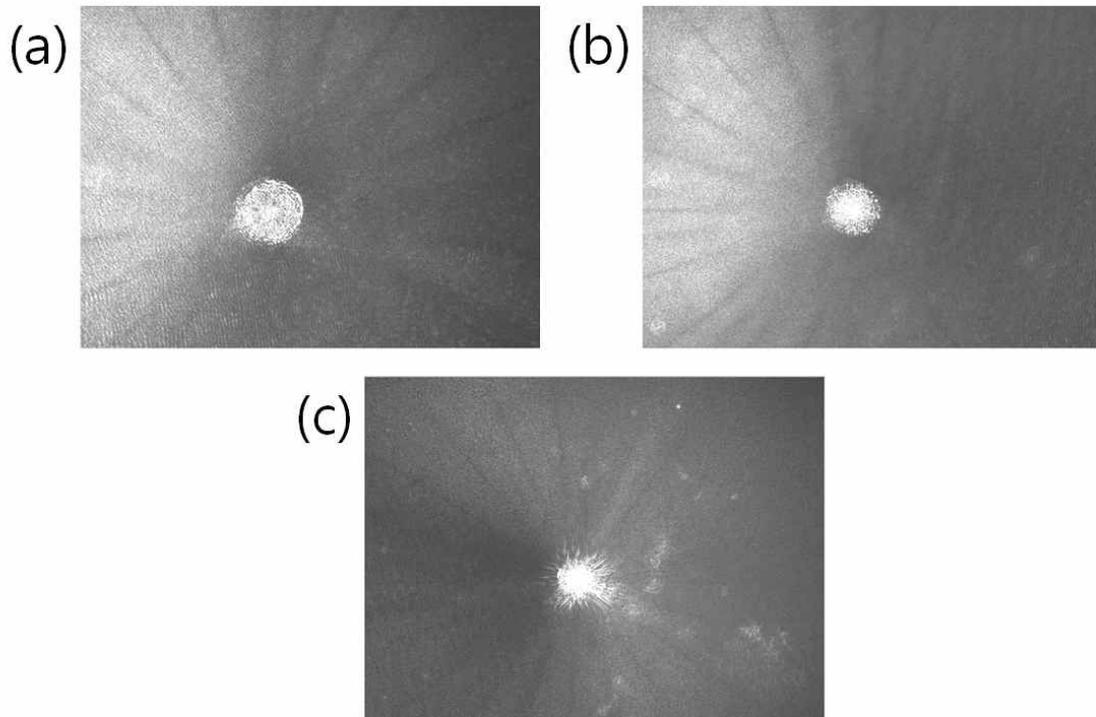


그림 3-18. 샘플단의 입사각을 기울여 입사했을 때 원뿔형 거울에 비친 영상. (a) 전체적으로 초점이 맞지 않고 중심에 집결된 광이 큼, (b) 광이 원뿔형 거울의 왼쪽에 쏠려 샘플영상이 왼쪽에만 보임, (c) 광이 전체적으로 퍼져서 모든 위치의 샘플 영상을 확인가능

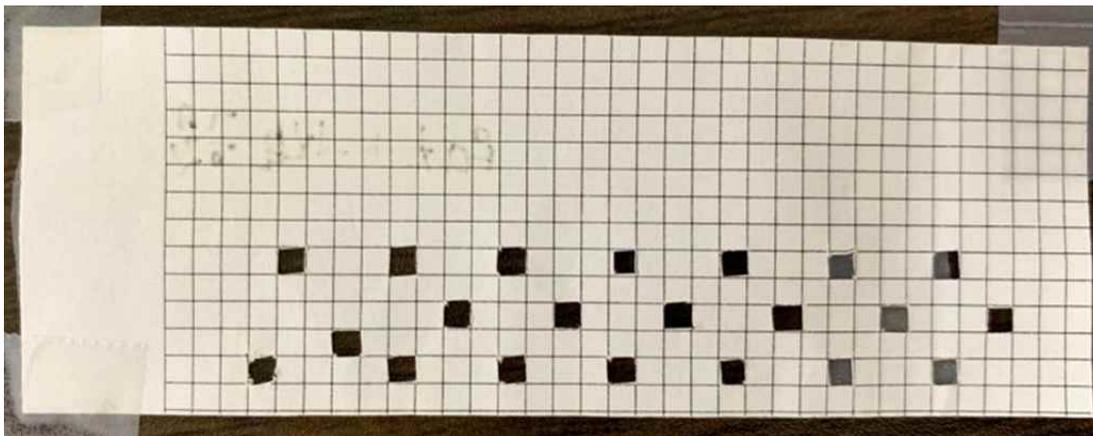


그림 3-19. 좁고 일정한 간격의 구멍이 뚫린 격자무늬 샘플 중 윗부분

이전 실험의 문제점을 해결하기 위하여 원뿔형 거울의 중심에서 광이 집결되는 부분을 임의로 가려보았는데, 중심에 집결되는 광을 가리는 방식이나 중심에 집결되지 않는 방식으로 해결하면 영상의 선명도가 높아질 거라고 예상하였다. 실험방법은 앞의 실험과 동일하며 영상을 보며 콜리메이터와 광분배기 사이에 핀셋과 아주 작은 종이조각을 사용하여 원뿔형 거울의 중심에 들어가는 광을 임의로 가려보았다. 그림 3-20(a)는 초점이 제대로 맞지 않고 광의 중심을 임의로 가리다보니 중심이 제대로 가려지지 않았으며 가려진 범위가 넓어 영상을 제대로 볼 수 없었다. 그림 3-20(b)는 그림 3-20(a)의 단점을 극복하기 위하여 종이조각을 더 작게 만들어서 실험을 진행하였다. 광이 전체적으로 퍼져있고 집게로 잡고 있는 부분인 아래를 제외한 모든 위치의 영상을 확인할 수 있었다.

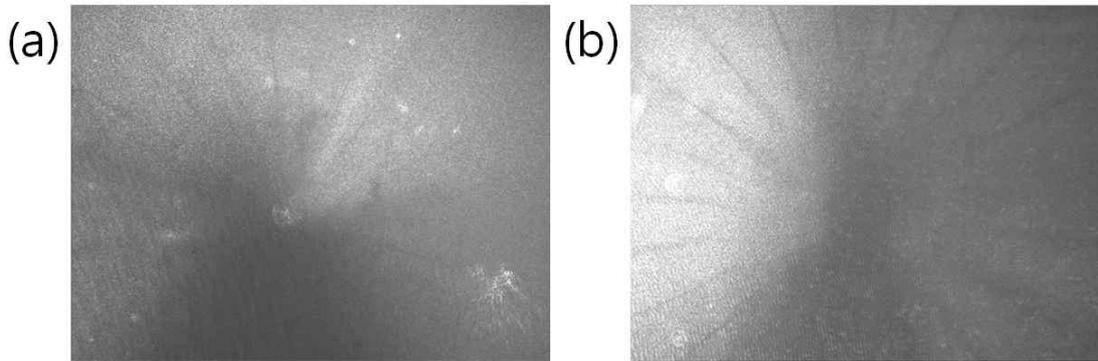


그림 3-20. 샘플단의 입사각을 기울여 입사하고 임의로 원뿔형 거울 중심에 집결되는 광을 가렸을 때의 원뿔형 거울 영상. (a) 초점이 맞지 않고 가려진 범위가 넓은, (b) 광이 전체적으로 퍼져서 아래 일부 가려진 부분을 제외한 모든 위치의 샘플이 보임

약 가로, 세로 1.5 mm의 한글 자음이 순서대로 쓰인 부분을 명확히 확인하기 위하여 종이 샘플의 일부를 잘라냈다. 그림 3-21(a)를 보면 샘플에서 잘린 부분의 모습을 확인할 수 있고, 한글 자음도 잘 보이나, 입사광이 한쪽으로 쏠려 그 부분의 글자는 볼

수 없게 되었다. 광원단의 각도를 조절했을 경우 광분배기의 각도가 달라짐에 따라 CMOS 카메라를 통해 볼 수 있는 영상의 범위가 작아지고, 원뿔형 거울의 중심과 레이저에서 나오는 광의 중심의 광정렬을 맞추는 과정이 까다로워지는 문제가 생겼다. 실험에서 사용된 샘플은 그림 3-21(b)를 통해 확인할 수 있다.

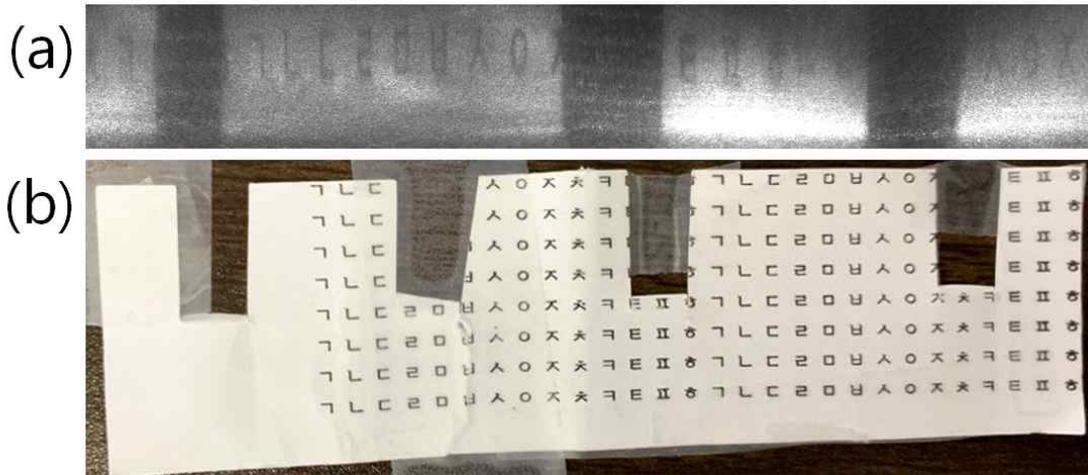


그림 3-21. (a) 한글 자음이 쓰인 일부를 절단한 샘플의 입사각을 기울여 입사하였을 때의 평면 영상, (b) 사용된 샘플

제 4 절 원통 내부 조영을 위한 광프로브 개발

원뿔형 거울의 중심에 집결되는 광을 분산시키기 위한 방법을 고안하였다. 원뿔형 거울의 중심에 집결되는 광을 분산시키고 원뿔형 거울의 주변은 전체적으로 광을 받기 위해서는 광을 링모양으로 만드는 방법이 가장 적절하다고 판단되었다. 광을 링모양으로 만드는 방법이 여러 가지가 있는데 그 중 가장 간단한 방법인 엑시콘 렌즈(Axicon lens)를 이용하였다. 엑시콘 렌즈란 이전 실험에서 계속 사용되던 원뿔형 거울과 비슷하게 생겼으나 렌즈의 역할을 하고 있는데 중심부의 각의 크기인 Apex각에 따라 광이 퍼지는 각도가 달라진다. 이는 그림 3-22를 보면 이해하기 쉽다. 여기에서 Apex Angle은 엑시콘 렌즈의 중심각이며, \acute{a} 는 $(180-\text{Apex angle})/2$, d_b 는 콜리메이션 광의 지름, t 는 링모양 광원에서의 두께 (d_b 의 1/2), L 은 엑시콘 렌즈에서 물체까지의 거리이며, L 의 길이에 따른 d_r 의 지름이다.

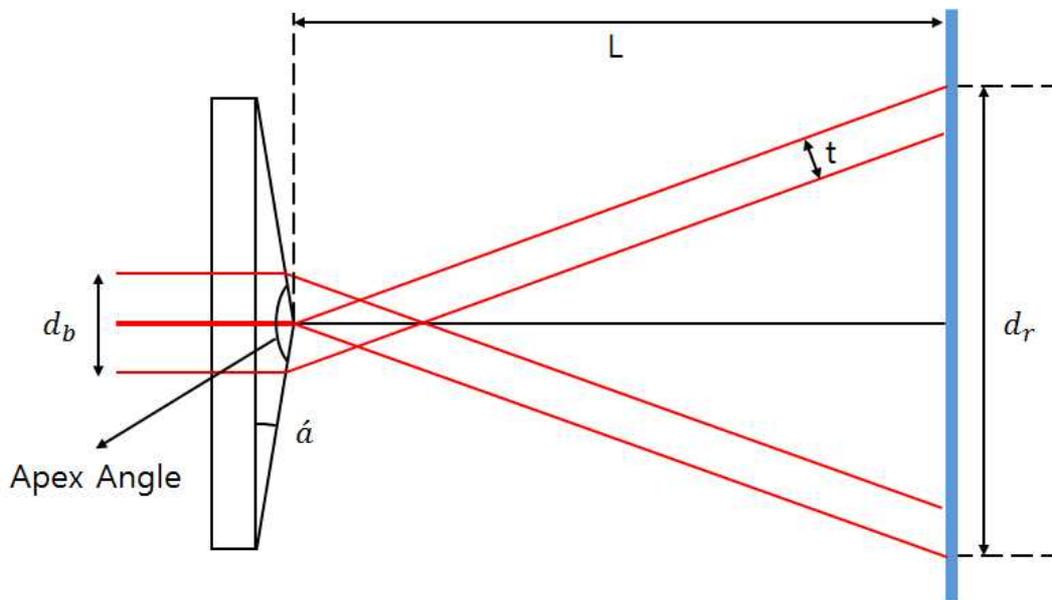


그림 3-22. 중심에 집결되는 광을 분산시키기 위한 엑시콘 렌즈

그림 3-22를 통해 알 수 있듯 엑시콘 렌즈를 사용할 경우 광이 중심으로 집결되지 않고 링모양으로 분산되고, 이렇게 분산된 광은 렌즈에서 멀어질수록 점점 더 퍼져나 가게 된다. 그래서 이 광을 퍼지지 않도록 콜리메이션 시켜주기 위해서는 각도가 같은 엑시콘 렌즈를 하나 더 사용하게 되면 분산된 광을 콜리메이션 시킬 수 있다. 그림 3-23에서 두 개의 엑시콘 렌즈를 이용한 링 형태의 광이 구성되는 방법을 이해할 수 있다.

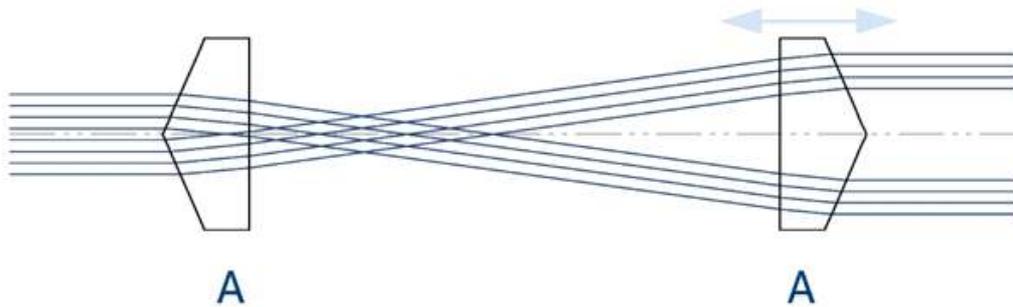


그림 3-23. 엑시콘 렌즈에서 퍼지는 광을 콜리메이션 시키기 위한 방법

실험에서 사용한 광원은 pigtailed He-Ne 레이저이며, 그림 3-24를 보면 콜리메이터를 통과한 뒤 광의 크기를 키워주기 위한 두 개의 렌즈와 이 광을 링모양으로 만들기 위한 엑시콘 렌즈(Axicon lens, 중심각 : 20.0° , $350 - 700 \text{ nm}$, $\text{Ø}25.4 \text{ mm}$ ($\text{Ø}1''$) Axicon)와 퍼지는 광을 일자로 정렬하기 위한 같은 스펙의 엑시콘 렌즈와 광분배기를 지나 원뿔형 거울에 반사되어 원통구조의 샘플 내부를 비추어주었다. 광을 받은 샘플의 내부는 다시 원뿔형 거울에 반사되어 광분배기, 초점렌즈, 이미징 렌즈를 지나 CMOS 카메라를 통해 영상으로 구현되었다. 이렇게 구현된 원뿔형 거울의 원형 영상은 랩뷰 프로그램을 통해 평면 영상으로 재구현되었다.

그림 3-25(a)를 보면 샘플에 새겨진 글씨를 볼 수 있고 샘플이 잘린 부분의 단차도 잘 보이는 것을 확인할 수 있었으나 샘플의 중심과 원뿔형 거울의 중심이 정확하게 맞지 않아 상이 왜곡되어 나오는 것을 확인할 수 있었다. 또한 엑시콘 렌즈로 인해 링 모양으로 만들어진 광의 광정렬이 제대로 맞지 않아 부분마다 명암차이가 큰 것을 볼 수 있다. 그림 3-25(b)는 그림 3-20과 같은 샘플을 사용하였으나 글씨가 쓰여 있지 않은 부분의 영상을 획득하였다. 이와는 달리 광이 일직선으로 잘 정렬되어 샘플의 대부분에 맞아 영상이 밝아짐과 동시에 부분별로 명암이 크게 달랐던 문제가 해결된 것을 확인할 수 있다. 그러나 광이 특정부분에 밀집되는 문제가 발생하였다. 그림 3-25(c)는 격자무늬에 구멍을 뚫어 사용하였다. 광량을 낮추고 광정렬을 정밀하게 하여 영상을 획득하였다. 광이 특정부분에 밀집되는 문제의 원인은 두 개의 엑시콘 렌즈의 중심이 정확히 맞지 않음과 동시에 렌즈가 정확히 평행이 아니라 살짝 휘어지며 광이 한쪽으로 몰림을 확인할 수 있었다. 그림에서 볼 수 있듯이 광이 밀집되는 부분이 없어졌으며, 구멍 뚫린 부분이 잘 보였고 이와 동시에 샘플의 모양도 잘 구분됨을 확인할 수 있었다.

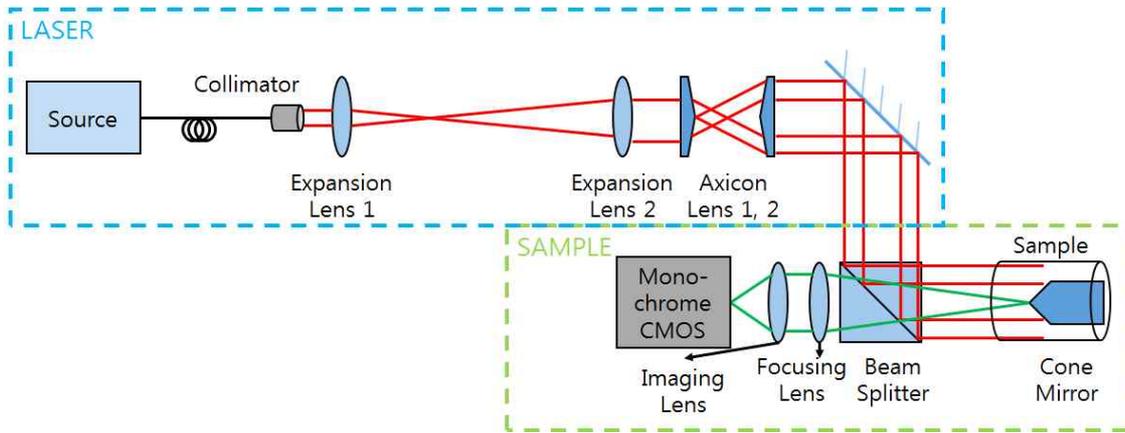


그림 3-24. 엑시콘 렌즈를 이용한 실험 개략도

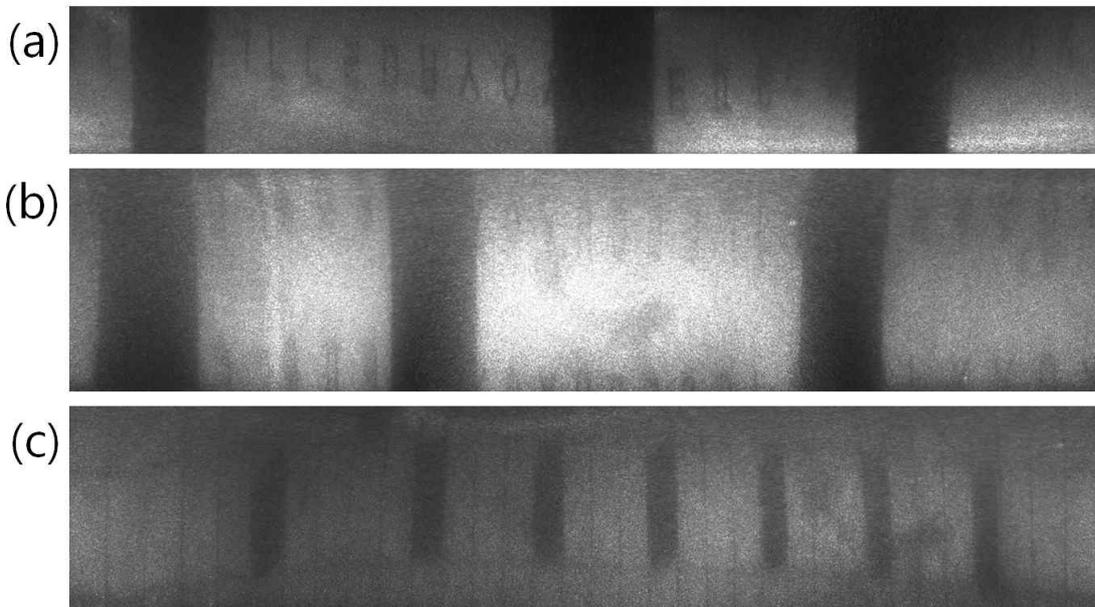


그림 3-25. 종이샘플이 반사된 원뿔형 거울 영상을 랩뷰 프로그램을 통해 재구현한 평면 영상. (a) 한글 자음이 새겨지고 중간이 잘린 종이샘플의 한글 자음 부분 영상, (b) 한글 자음이 새겨지고 중간이 잘린 종이샘플의 백지 부분, (c) 격자무늬에 구멍이 뚫린 종이샘플의 영상

이전 실험 결과에 의해 광섬유 다발의 영상 구현 특성과 원뿔형 거울의 360도 측면 영상을 볼 수 있는 장점, 그리고 멀티캠의 화질을 살리기 위하여 함께 실험을 진행하였다. 실험에서 사용한 광원은 pigtailed He-Ne laser이다. 그림 3-26을 보면 광원에서 나온 광은 콜리메이터를 통과한 뒤, 광의 크기를 키워주기 위한 두 개의 렌즈와 광을 링모양으로 만들어주기 위한 엑시콘 렌즈를 지나고 다시 광을 콜리메이션 시켜주기 위한 엑시콘 렌즈를 통과한 뒤 광분배기를 지나 원뿔형 거울에 반사되어 원통구조의 샘플 내부를 비추어주었다. 광을 받은 샘플은 다시 원뿔형 거울에 반사되어 광분배기, 초점렌즈, 이미징렌즈, 광섬유 다발(#53-840, Edmund Optics, N. A : 0.55, Number of Fibers : 50419, Fiber Diameter : 12 μm , Outer Diameter : 3.2 mm, Length : 3 inches)을 지난 뒤 멀티캠을 통해 영상으로 구현된다. 구현된 영상은 랩뷰 프로그램을 통하여 ROI(region of interest)를 설정하고 설정된 영역에 대해서 평면영상으로 재구현된다. 그림 3-27에서 광섬유 다발을 통과하였을 때 보이는 원뿔형 거울의 영상을 확인할 수 있다.

그림 3-28(a)에서는 랩뷰 프로그램에서 측정된 영상 위에 지정한 ROI를 확인할 수 있으며, 그림 3-28(b)에서는 설정된 ROI에 대해서 이미지 unwrapping에 의해서 재구현된 평면 영상을 확인할 수 있다. 자유공간에서 엑시콘 렌즈를 이용한 링 형태의 광을 형성하고 이 광을 이용하여 실린더 형태의 샘플 내부를 스캔하기 위한 프로브 빔으로 활용하였다. 실제 내시경에 사용되고 있는 광섬유 다발을 이용하여 프로브 빔을 샘플 표면까지 전달하였다. 엑시콘 렌즈의 경우 광의 반경과 링의 두께를 제어하는데 효율적이지만 링 형태의 광을 만드는데 있어서 광정렬을 위한 공간의 배치가 시스템을 크게 확장시켜야 함과 동시에 광정렬에 따른 수광되는 광세기의 효율이 민감하게 바뀌는 문제점을 가지게 되어 이를 해결하기 위한 방안으로 직경이 확장된 원형의 광을 그대로 이용하면서 광정렬이 평이한 방법을 고안하여 활용하였다.

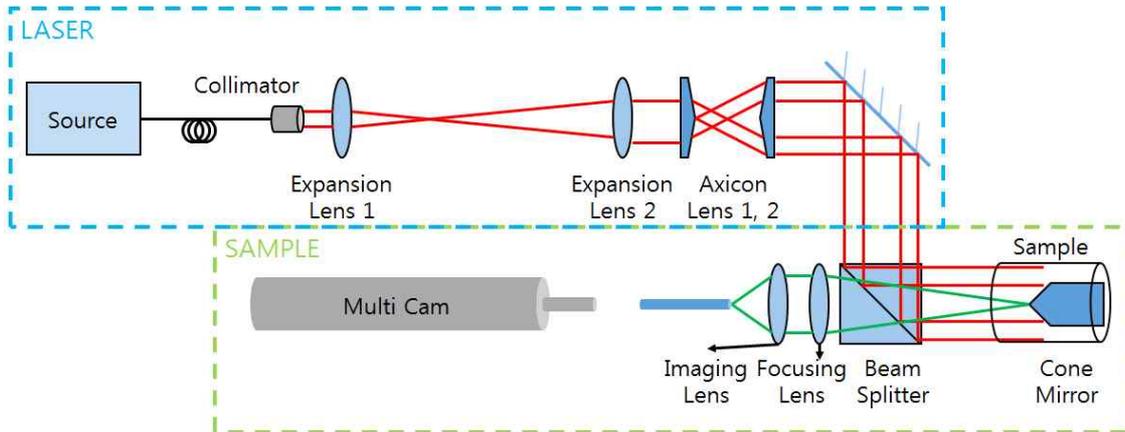


그림 3-26. 샘플의 측면 조영을 위한 광프로브 개략도

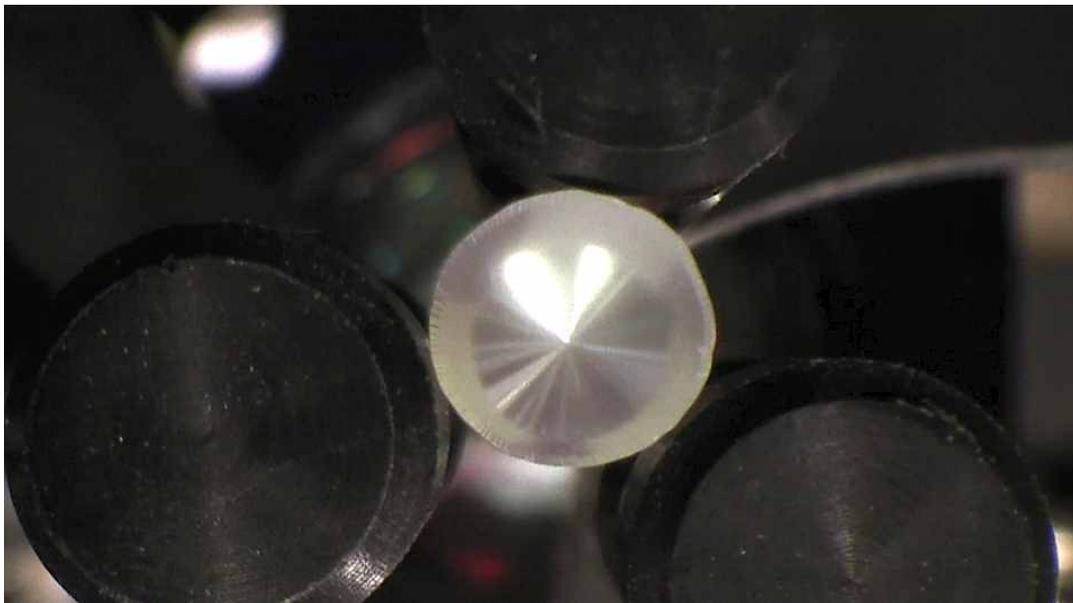
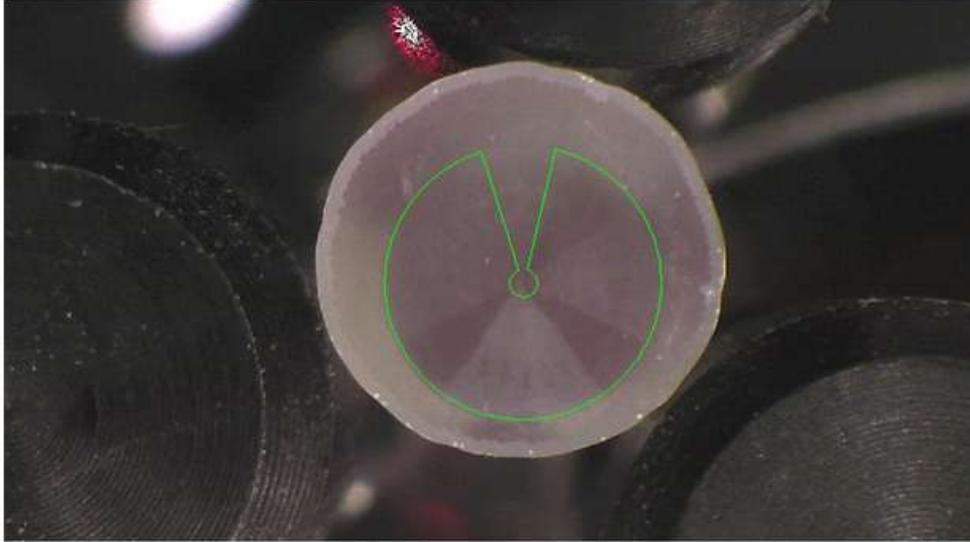


그림 3-27. 광섬유 다발에 의해 보이는 원뿔형 거울의 영상

(a)



(b)



그림 3-28. ROI 설정 이후에 설정된 영역에 대해서 재구현된 평면 영상. (a) 원뿔형 거울을 측정하는 영상에 ROI가 설정된 모습, (b) (a)의 ROI에 대해서 평면영상으로 재구현된 결과 영상

본 실험에서 사용한 광원은 발광다이오드(LED, Maximum Current : 1000 mA, Typical output power : 840 mW, MCWHL5, THORLABS)이며, 그림 3-29와 같이 광원에서 나온 광이 광분배기를 통과하여 광섬유 다발을 지나 원뿔형 거울(Diameter : 3.0 mm, Length : 3.0 mm, Core Angle : 90°, 400 - 700 nm, #45-938, Edmund Optics)에서 반사되어 샘플을 비추었다. 이 샘플은 다시 원뿔형 거울에 반사되어 광섬유 다발, 광분

배기, 초점 렌즈(Focal length : 75 mm, 400 - 700 nm, AC254-075-A-ML, THORLABS),
 이미징 렌즈(Focal length : 30 mm, 400 - 700 nm, AC254-030-A-ML, THORLABS)를 지
 나 멀티캠을 통해 영상으로 구현되었다. 이렇게 구현된 원뿔형 거울의 원형 영상은 랩
 뷰 프로그램을 통해 평면 영상으로 재구현되었다. 이 실험에서 광섬유 다발과 원뿔형
 거울을 종이로 된 샘플로 여러 번 감아서 고정한 후 실험을 진행하였다.

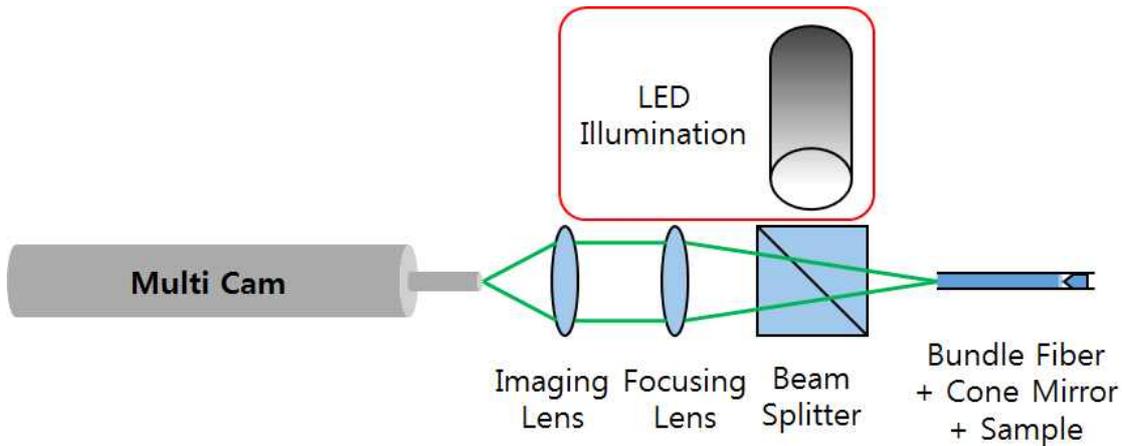


그림 3-29. 원통형 내부 측면 영상을 획득하기 위한 개략도

그림 3-30(a)는 색이 다른 줄무늬가 새겨진 종이샘플이 원뿔형 거울에 비추어진 모
 습과 이 영상에 ROI가 설정된 영상이다. 그림 3-30(b)는 그림 3-30(a)를 랩뷰 프로그램
 을 통해 재구현한 평면 영상이다. 작은 크기의 원뿔형 거울을 사용하였을 경우 카메라
 의 초점범위 안에 다 들어가 영상이 더욱 선명해짐을 확인할 수 있었다. 이 때 사용한
 샘플은 그림 3-30(c)를 통해 확인할 수 있다.

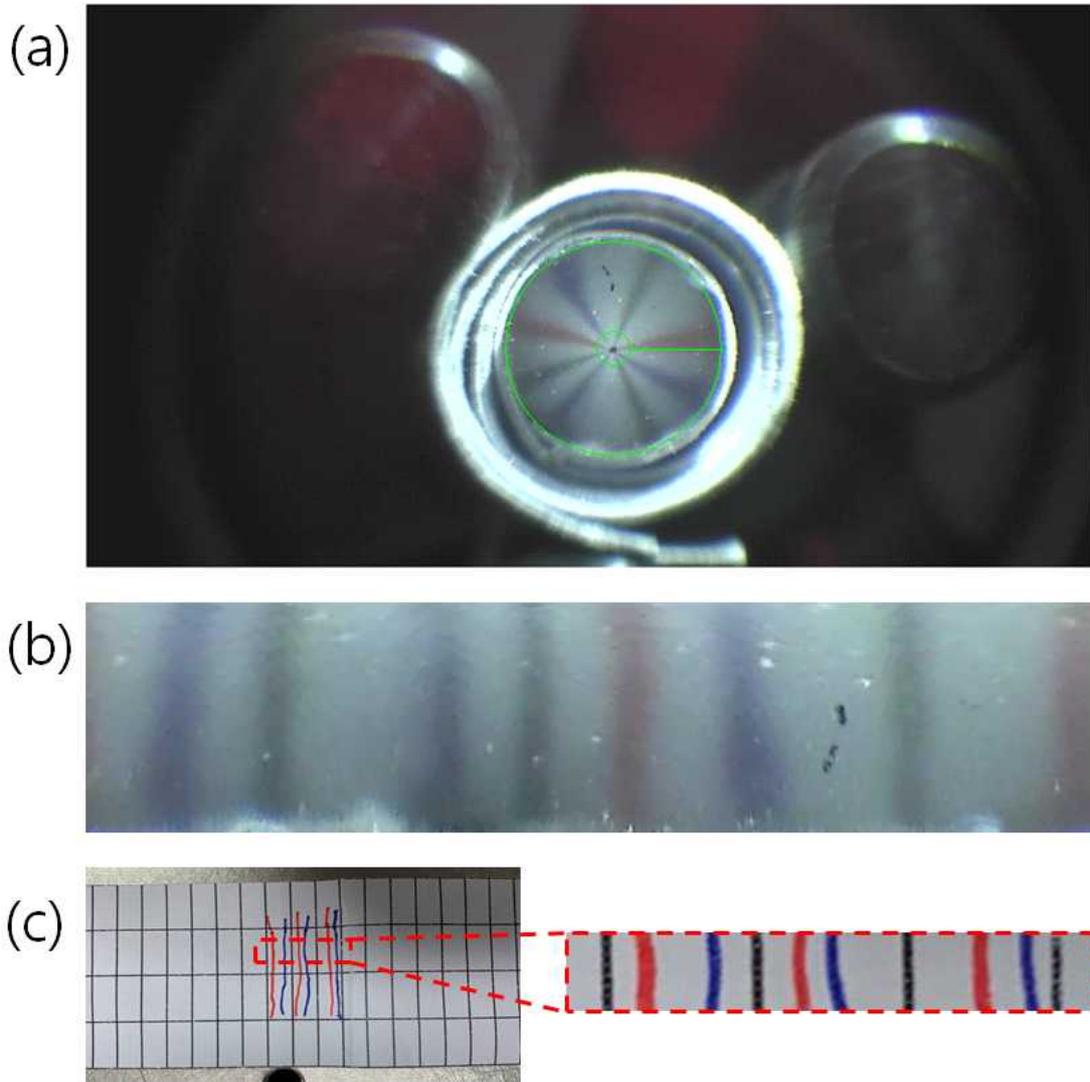


그림 3-30. (a) 색이 다른 줄무늬가 새겨진 종이 샘플의 원뿔형 거울의 ROI 설정영상, (b) (a)를 램뷰 프로그램을 통해 재구현한 평면 영상, (c) 색이 다른 줄무늬가 새겨진 종이 샘플

이전 실험결과에 의해 광섬유 다발과 원뿔형 거울을 최대한 가까이 붙여 하나의 도구처럼 사용하였을 경우 각자 떨어져 있을 경우보다 초점잡기 용이함을 확인할 수 있었고, 원뿔형 거울의 크기가 작아짐에 따라 카메라의 초점에서 벗어나는 부분이 거의 없어 영상이 선명해짐을 확인할 수 있었다. 이에 이어 샘플을 이동시켜 영상을 이어 붙인 파노라마 영상을 획득하였다.

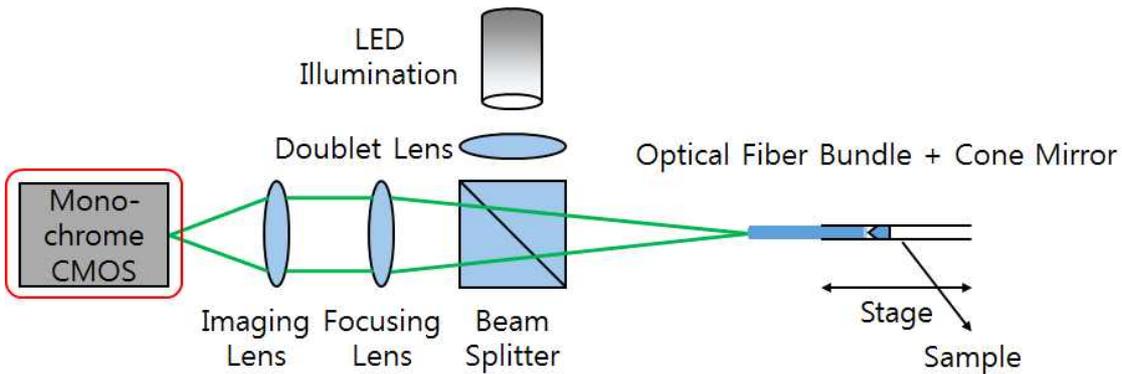


그림 3-31. 측면 파노라마 영상 구현을 위한 개략도

본 실험에서 사용한 광원은 LED이며, 그림 3-31과 같이 광원에서 출력된 광을 퍼지지 않도록 하는 역할의 더블렛 렌즈(Focal length : 30 mm, 400 - 700 nm, AC254-030-A-ML, THORLABS)와 광분배기를 지나 광섬유 다발을 통과하여 원뿔형 거울에 반사되어 원통구조의 샘플 내부를 비추었다. 광을 받은 샘플의 내부는 다시 원뿔형 거울에 반사되어 광섬유 다발(N. A : 0.55, Number of Fibers : 50419, Fiber Diameter : 12 μm , Outer Diameter : 3.2 mm, Length : 1 inches, #53-839, Edmund Optics), 광분배기, 초점 렌즈(Focal length : 75 mm, 400 - 700 nm, AC254-075-A-ML, THORLABS), 이미징 렌즈(Focal length : 60 mm, 400 - 700 nm, AC254-060-A-ML, THORLABS)를 지나 CMOS 카메라(Monochrome Camera, Pixel (H*V) : 1280*1024, Pixel Size (H*V(μm)) : 5.3*5.3, EO-1312M, Edmund Optics)를 통해 영상으로 구현되었다. 이렇게 구현된 원뿔형

거울의 원형 영상은 랩뷰 프로그램을 통해 평면 영상으로 재구현되었다. 이 실험에서 광섬유 다발과 원뿔형 거울을 고정시키기 위하여 투명한 테이프를 사용하였다.

그림 3-32는 원통모양의 샘플에 스테이지를 설치하여 같은 간격을 수동으로 이동시켜 이어진 부분을 촬영하여 만들어진 평면영상을 순차적으로 8개 획득한 뒤 이를 파노라마 형식으로 이어 붙인 영상이며, 이 때 사용한 샘플은 그림 3-32를 통해 확인할 수 있다.

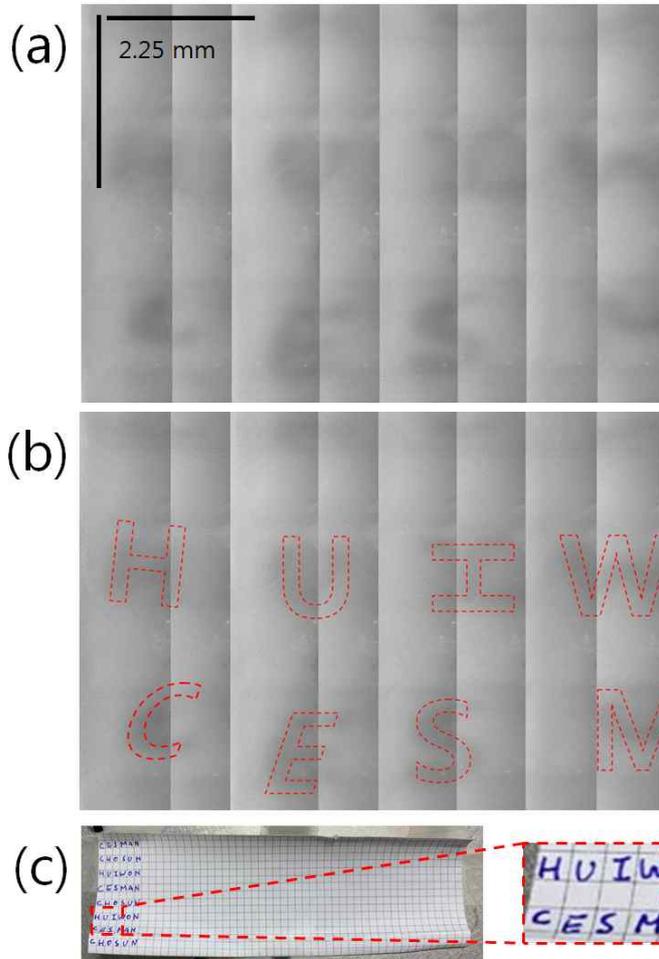


그림 3-32. (a) 1인치 광섬유 다발을 이용하여 획득한 측면 파노라마 영상, (b) (a)의 샘플의 모습을 본 뜬 영상, (c) 사용된 샘플

위의 실험과 동일한 조건, 동일한 방식으로 길이가 3인치인 광섬유 다발(N. A : 0.55, Number of Fibers : 50419, Fiber Diameter : 12 μm , Outer Diameter : 3.2 mm, Length : 3 inches, #53-840, Edmund Optics)로 교체하여 실험을 추가 진행하였으며, 이때 얻은 평면 영상은 총 40개이다. 40개의 평면영상을 이어붙인 파노라마 영상은 그림 3-33을 통해 확인할 수 있다. 이 때 사용된 샘플은 가로 세로 2 mm의 격자에 직접 글씨를 새겨 넣은 종이 샘플로 이도 그림 3-33을 통해 확인할 수 있다.

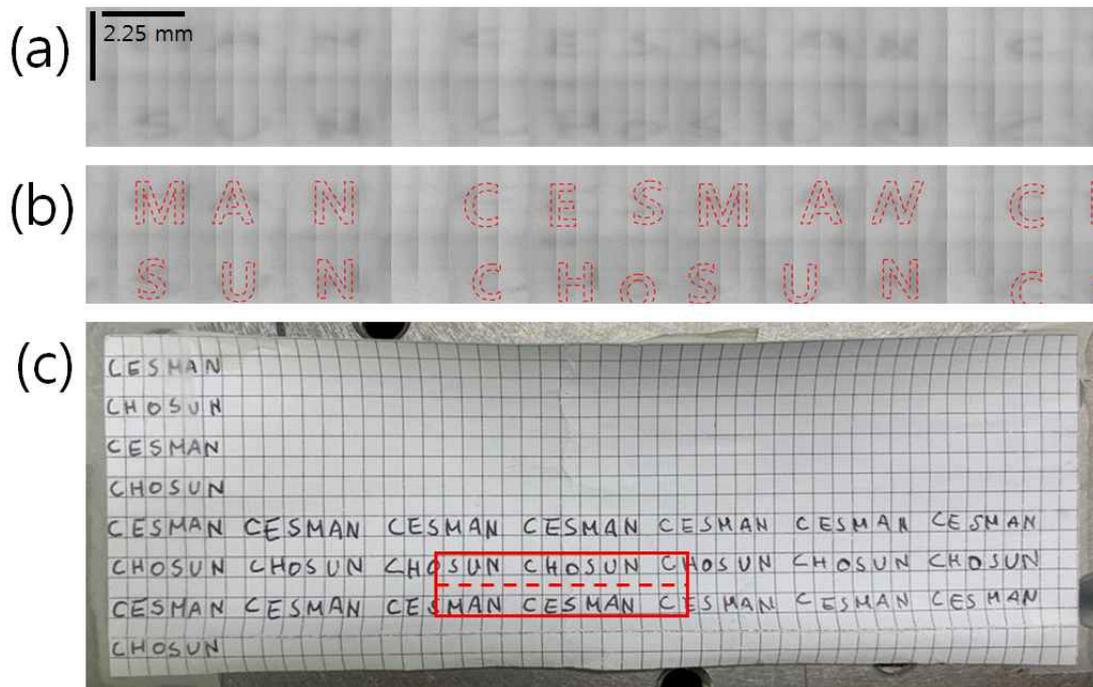


그림 3-33. (a) 3인치 광섬유 다발을 이용하여 획득한 측면 파노라마 영상, (b) (a)의 샘플의 모습을 본 뜬 영상, (c) 사용된 샘플

제 5 절 측면 형광 영상 구현

형광영상이 제대로 측정 가능하가를 확인하기 위하여 간단하게 실험 장치를 꾸며 실험을 진행하였다. 그림 3-34를 보면 660 nm 레이저에서 나온 광이 더블렛 렌즈, 여기 필터, 이색성 거울을 차례로 지나 원뿔형 거울에서 반사되어 원통모양의 샘플을 비추게 되었다. 샘플의 내부에 영문모양으로 붙어있는 형광비드들이 광에 의해 반사되는데 이는 원뿔형 거울에 반사되어 이색성 거울, 방출필터, 초점렌즈(Focal length : 150 mm, 650 - 1050 nm, AC254-150-B-ML, THORLABS), 이미징렌즈(Focal length : 50 mm, 650 - 1050 nm, AC254-050-B-ML, THORLABS)를 지나 CMOS 카메라를 통해 영상으로 구현되었으며, 이는 그림 3-35(a)를 통해 확인할 수 있다. 구현된 원뿔형 거울의 원형영상은 측면 파노라마 영상 구현과 같은 방식으로 진행하였고 이는 그림 3-35(b)를 통해 확인할 수 있다. 위의 실험결과를 통해 CMOS 카메라를 이용하여 형광영상 획득이 가능함을 확인할 수 있었으며, 원뿔형 거울에 반사된 형광물질의 형광영상을 얻을 수 있음을 확인하였다.

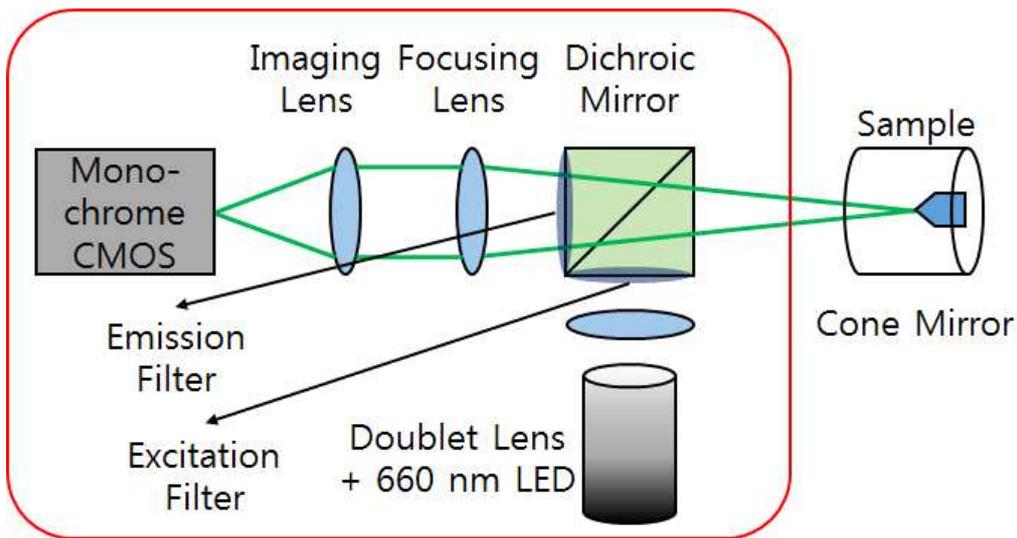
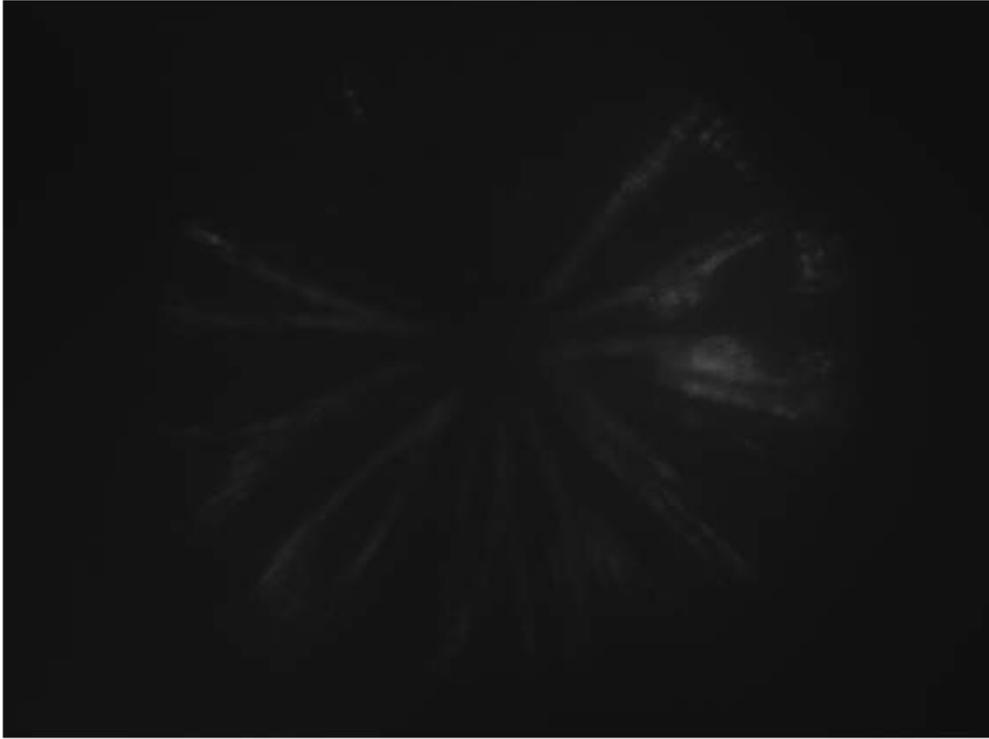


그림 3-34. 형광 영상 획득을 위한 개략도

(a)



(b)



그림 3-35. (a) CMOS 카메라를 통해 볼 수 있는 원뿔형 거울에 비추어진 형광영상, (b) (a)의 영상을 랩뷰 프로그램을 통해 재구현한 평면 영상

그림 3-36은 본 실험에서 사용된 형광비드를 형광 현미경을 이용하여 확인한 영상이다. 3-36(a)는 형광비드에 백색광을 투과시킨 영상이며, 3-36(b)는 파란색 계열의 광원, 3-36(c)는 녹색 계열의 광원, 3-36(d)는 붉은색 계열의 광원을 사용하였다. 이 때 붉은색 계열의 광원을 사용하였을 때 형광영상이 뚜렷하게 보이는 것을 확인할 수 있었다.

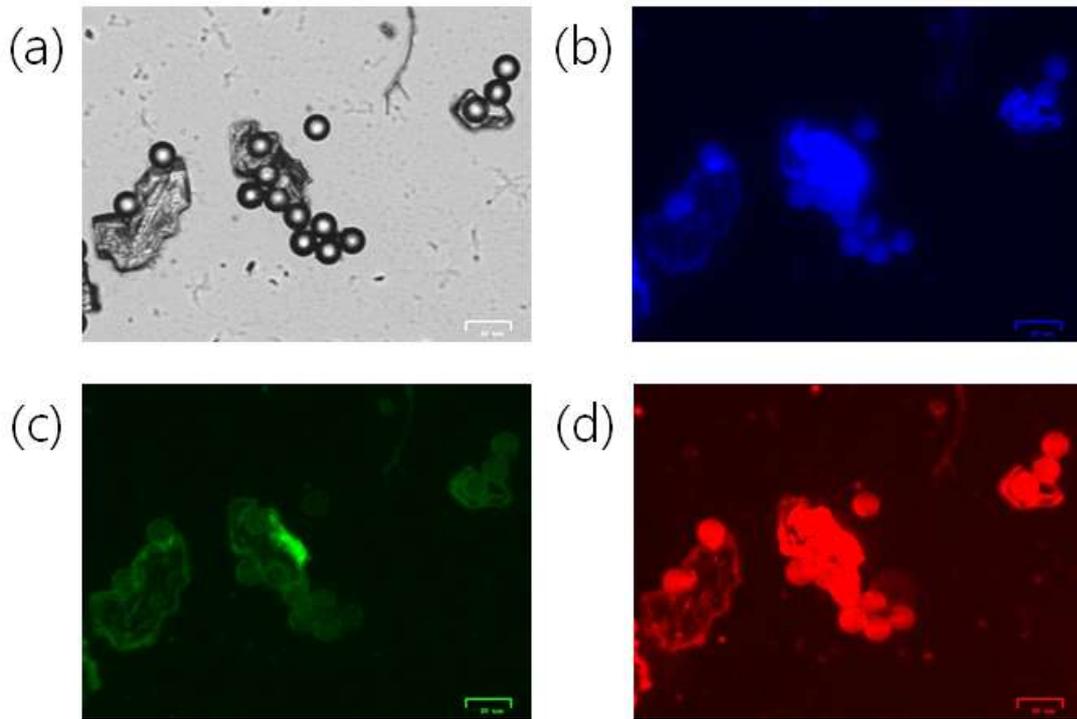


그림 3-36. 형광현미경을 통해 본 형광비드의 모습. (a) Bright field, (b) blue, (c) green, (d) red

형광 영상 구현을 위하여 발광다이오드는 660 nm 레이저(660 nm, Maximum Current : 1200 mA, LED Output Power : 700 mW, M660L3, THORLABS)로 교체하고, 광분배기를 이색성 거울(Dichromic mirror, 685 nm, FF685-DiO2, Semrock)로 교체하였으며, 여기필터(655 nm, FF02-655/40, Semrock)을 방출필터(716 nm, FF01-716/40, Semrock)를 삽입하여 그림 3-37에서와 같이 실험을 진행하였다.

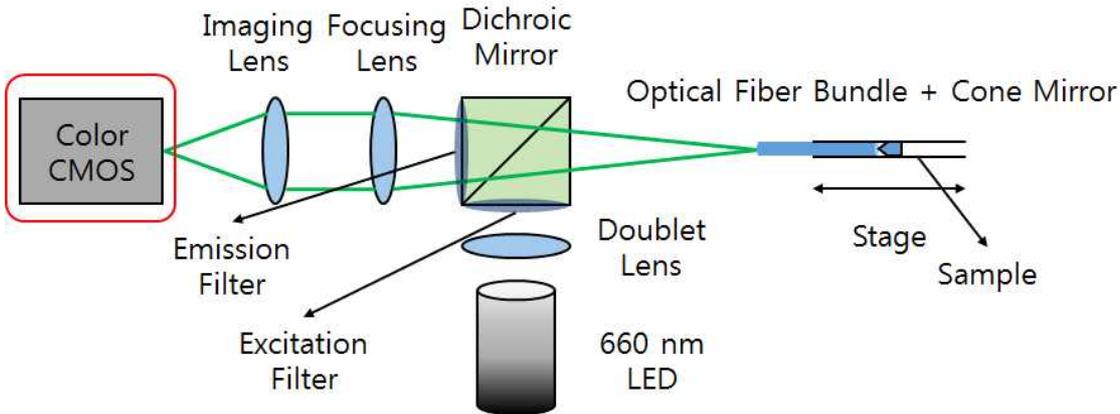


그림 3-37. 형광 파노라마 영상 획득을 위한 개략도

형광 파노라마 영상은 660 nm 레이저에서 나온 광을 퍼지지 않도록 하는 역할의 이중렌즈(Doublet Lens, Focal length : 35 mm, 650 - 1050 nm, AC254-035-B-ML, THORLABS), 여기필터, 이색성 거울, 광섬유 다발을 차례로 지나 원뿔형 거울에서 반사되어 원통모양의 샘플을 비추었다. 이 때 샘플의 내부에 영문모양으로 붙어있는 형광비드들(15 μ m, 여기 : 645 nm, 방출 : 680 nm)이 광에 의해 반사되는데 이는 원뿔형 거울에 반사되어 광섬유 다발, 이색성 거울, 방출필터, 초점렌즈(Focal length : 150 mm, 650 - 1050 nm, AC254-150-B-ML, THORLABS), 이미징렌즈(Focal length : 50 mm, 650 - 1050 nm, AC254-050-B-ML, THORLABS)를 지나 CMOS 카메라를 통해 영상으로 구현되었다. 이 때 원뿔형 거울과 광섬유 다발은 투명한 재질의 테이프를 사용하여 고정

한 뒤 형광이 도포된 종이샘플을 원통모양으로 감싸 실험을 진행하였는데 이 때 샘플에 스테이지를 달아 샘플이 움직일 수 있도록 하였다. 32개의 평면영상을 이어 붙여 만든 형광 파노라마 영상과 샘플은 그림 3-38을 통해 확인할 수 있다.

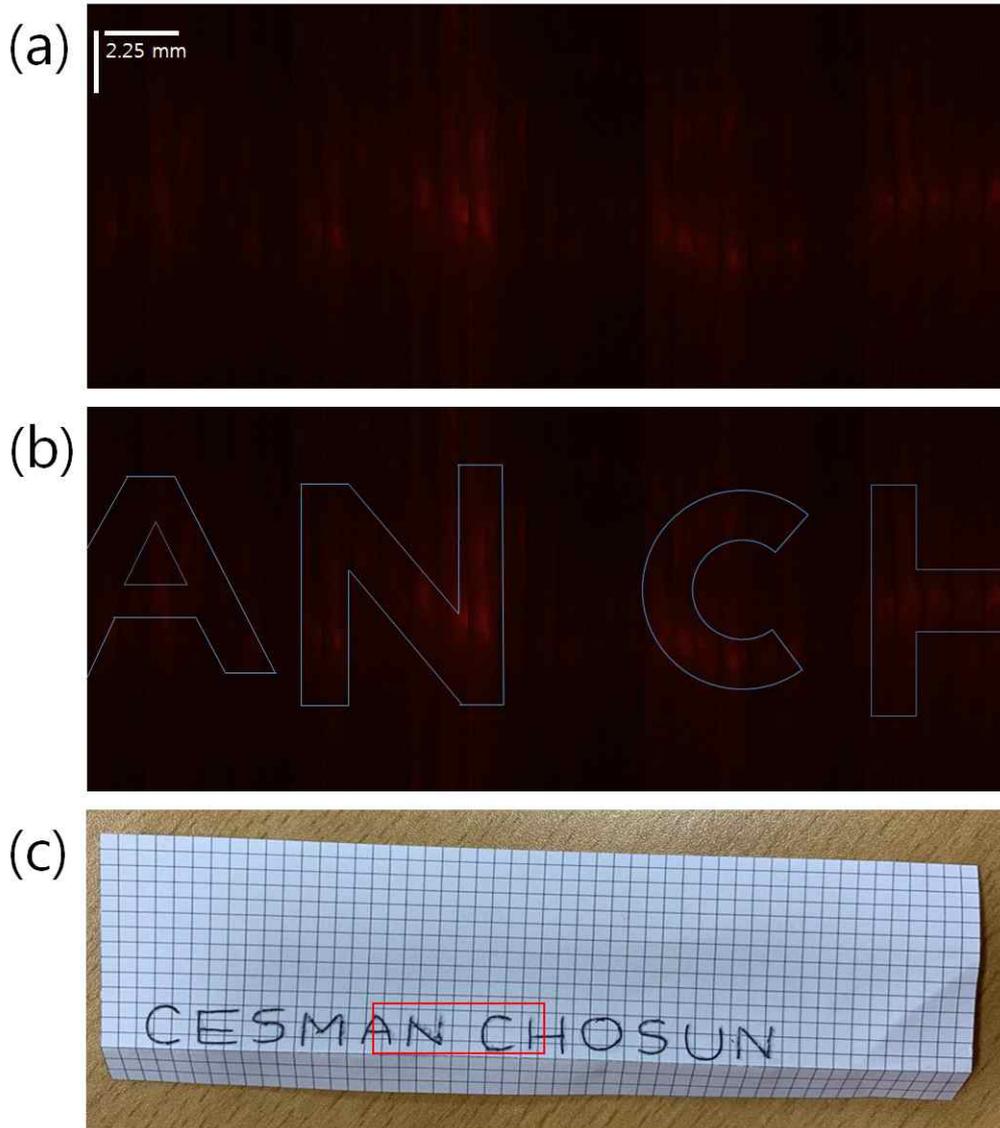


그림 3-38. (a) 32개의 평면영상을 이어 붙여 만든 형광 파노라마 영상, (b) (a)의 샘플의 모습을 본 뜬 영상, (c) 사용된 샘플

제 6 절 그린 렌즈를 이용한 측면 파노라마 영상

광섬유 다발의 영상을 보다 선명하게 획득하기 위해서 초점 렌즈를 그린 렌즈로 변경하여 실험을 진행하였다. 외부에서 광을 받은 샘플이 그림 3-39와 같이 그린 렌즈 (GRIN Lens, Ø1.8 mm, 0.29 Pitch, 0°, 630 nm Design Wavelength, Uncoated, GRIN2906, THORLABS)와 광섬유 다발, 이미징 렌즈를 차례로 지나 멀티캠을 통해 영상을 구현하였다. 그림 3-39를 보면 그린 렌즈를 통해 종이 샘플의 영상이 보이는 것을 확인할 수 있다. 샘플은 가로, 세로 약 2.2 mm인 격자무늬에 직접 글자를 새겨 사용하였으며 이는 그림 3-40을 통해 확인할 수 있다. 실험에 사용된 그린 렌즈의 초점거리는 1.9 mm 이었으나 실제 실험에서 초점이 잡힌 거리는 약 2.9 mm 이었다. 영상을 통해 영상이 이전에 사용했던 렌즈와 비슷하게 보임을 확인할 수 있었고, 일반 렌즈와 마찬가지로 상이 좌우 혹은 위아래가 바뀌는 것을 확인할 수 있었지만 초점거리 근처에서 초점이 맞지 않음을 확인할 수 있었다. 또한 사용한 카메라의 영상이 흐릿하게 보이고 초점이 제대로 맞지 않은 부분을 개선하기 위한 방법을 모색하였다.

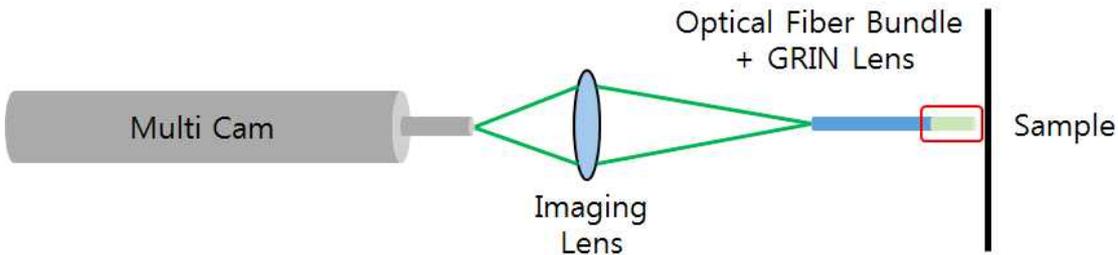
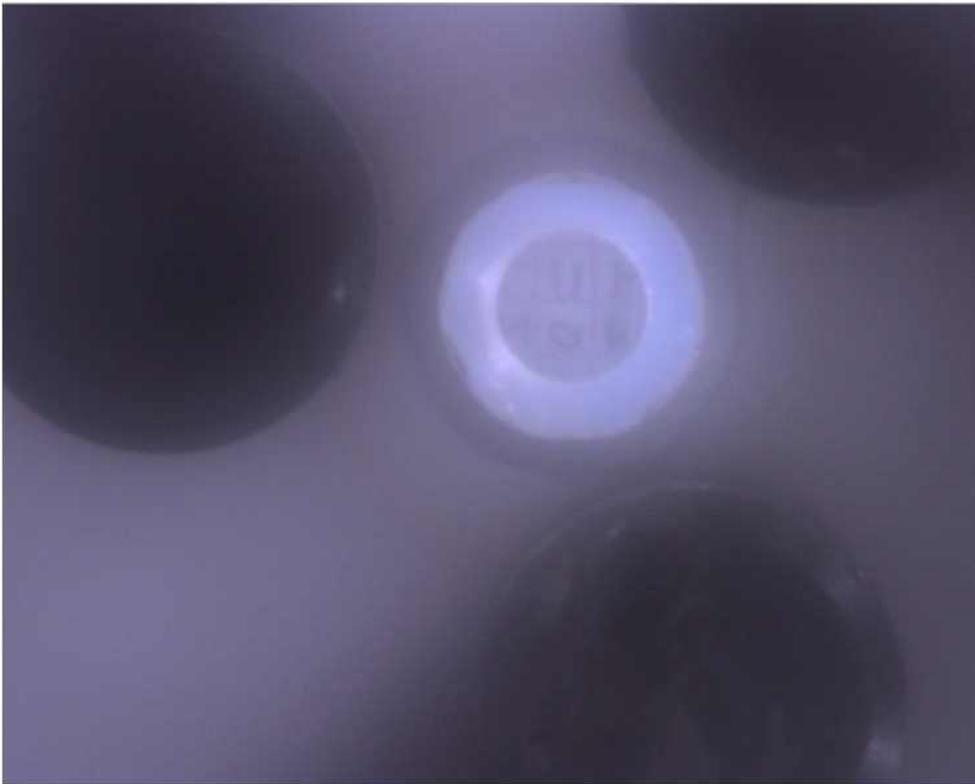


그림 3-39. 그린 렌즈를 이용한 평면영상획득을 위한 개략도

(a)



(b)

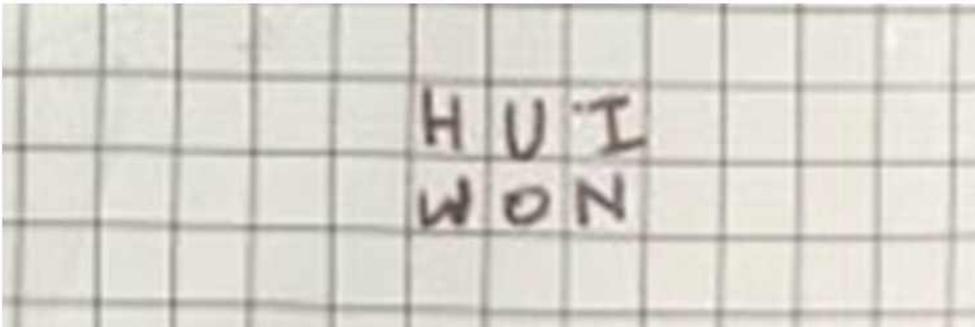


그림 3-40. (a) 그린 렌즈를 통해 보이는 샘플의 평면 영상, (b) 가로, 세로 약 2.2 mm인 격자무늬에 글씨를 써넣은 샘플

본 실험에서는 이전 실험에서의 영상이 뿌옇게 보이며 초점이 제대로 맞지 않는 부분을 개선시키기 위하여 샘플이 움직일 때 용이하도록 스테이지를 사용하여 정밀한 광정렬을 시도하였다. 외부에서 광을 받은 샘플이 그림 3-41과 같이 그린 렌즈와 광섬유 다발, 이미징 렌즈를 차례로 지나 멀티캠을 통해 영상을 구현하였다. 이 때 사용한 샘플은 resolution 타겟(Dimensions (inches) : 2x2, Thickness : 1.50 mm, Positive Target, #38-257, EDMUND OPTICS)이었는데 유리샘플의 반사도가 높아 상이 제대로 보이지 않아 반사도를 줄이기 위한 방법으로 샘플을 종이에 복사하여 사용하였으며, 타겟의 크기별로 4부분을 나누어 영상을 획득하였다. 그림 3-42(a), 3-42(b), 3-42(c), 3-42(d)는 차례대로 그림 3-43의 구역 1, 구역 2, 구역 3, 구역 4이다. 영상이 선명하게 보여 종이 샘플의 질감까지 확인할 수 있었다. 그러나 이 때 사용된 멀티캠이 자동으로 초점을 잡아 원하는 초점면을 조절하는데 어려움이 발생하였다. 사용된 종이 샘플은 그림 3-43을 통해 확인할 수 있다. 이 종이 샘플의 원본은 그림 3-44를 통해 확인할 수 있으며, 표 1을 통해 샘플 구역별 두께도 확인할 수 있다 [35].

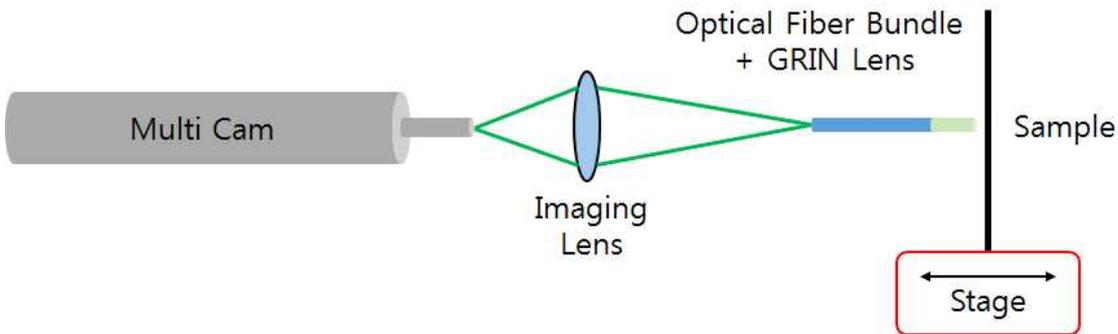


그림 3-41. 그린 렌즈와 스테이지를 이용한 영상 획득을 위한 개략도

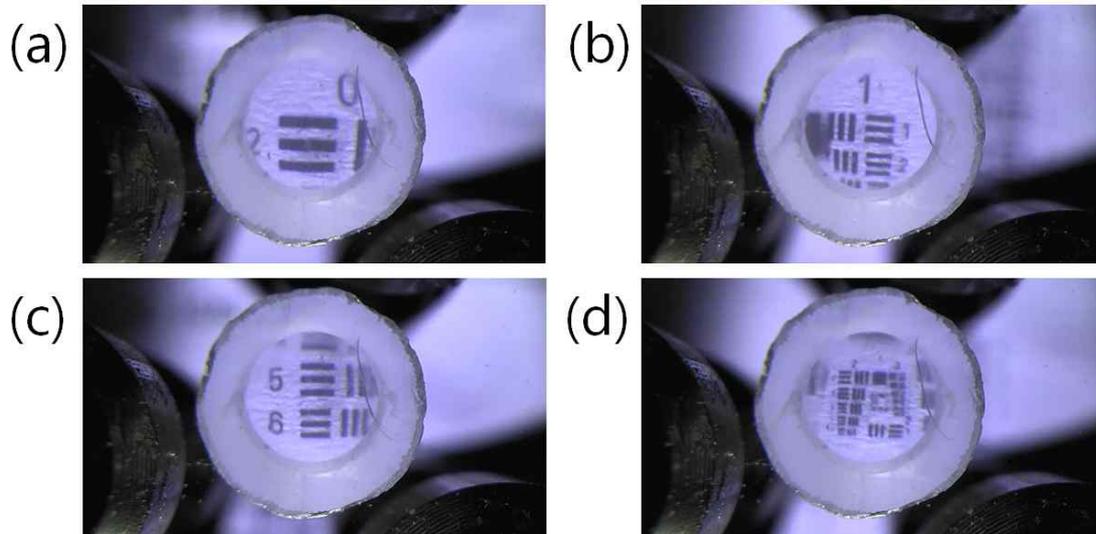


그림 5-42. 그린 렌즈와 스테이지를 이용하여 획득한 영상. (a) 구역 1의 영상, (b) 구역 2의 영상, (c) 구역 3의 영상, (d) 구역 4의 영상

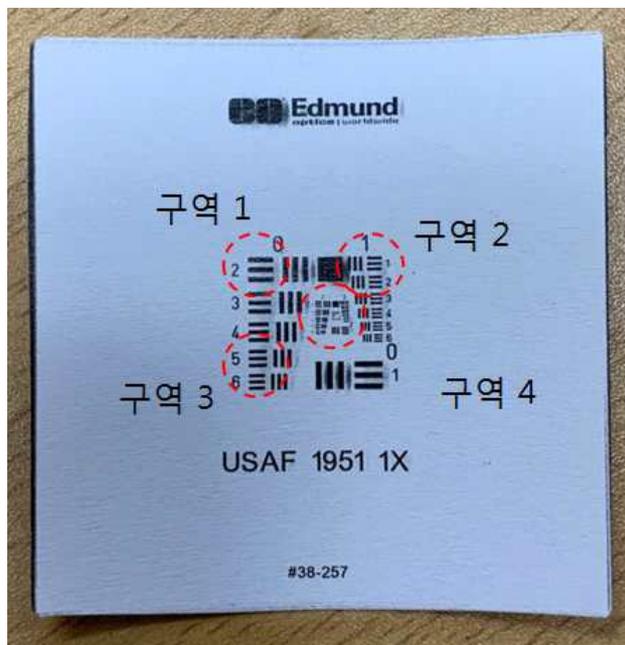


그림 3-43. 멀티캠과 그린 렌즈를 이용한 평면 영상의 종이 샘플



그림 3-44. 멀티캠과 그린 렌즈를 이용한 평면 영상의 종이 샘플 원본

표 3-1. Number of line pairs / mm in USAF resolving power test target 1951

Element	Group Number											
	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.250	0.500	1.00	2.00	4.00	8.00	16.00	32.0	64.0	128.0	256.0	512.0
2	0.281	0.561	1.12	2.24	4.49	8.98	17.96	35.9	71.8	143.7	287.4	574.7
3	0.315	0.630	1.26	2.52	5.04	10.08	20.16	40.3	80.6	161.3	322.5	645.1
4	0.354	0.707	1.41	2.83	5.66	11.31	22.63	45.3	90.5	181.0	362.0	724.1
5	0.397	0.794	1.59	3.17	6.35	12.70	25.40	50.8	101.6	203.2	406.4	812.7
6	0.445	0.891	1.78	3.56	7.13	14.25	28.51	57.0	114.0	228.1	456.1	912.3

자동 초점에 의해 상의 초점을 맞추기 어려운 점을 개선시키기 위하여 이전에 사용하던 CMOS 카메라를 사용하여 영상을 구현해 보았다. 외부에서 광을 받은 샘플이 그림 3-45와 같이 그린 렌즈와 광섬유 다발, 이미징 렌즈를 차례로 지나 CMOS 카메라 (Monochrome Camera, Pixel (H*V) : 1440*1080, Pixel Size (H*V(μm)) : 3.45*3.45, DMK37BUX273, THE IMAGING SOURCE)를 통해 영상을 구현하였다. 이 때 사용한 샘플은 앞의 실험과 동일한 샘플이었으며, 타겟의 크기별로 5부분을 나누어 영상을 획득하였다. 그림 3-46(a), 3-46(b), 3-46(c), 3-46(d), 3-46(e)는 차례대로 그림 3-46(f)의 구역 1, 구역 2, 구역 3, 구역 4, 구역 5이다. 샘플영상은 잘 보이나 광섬유 다발 주변과 전체적으로 영상이 흐려지는 부분을 해결하지 못하였다.

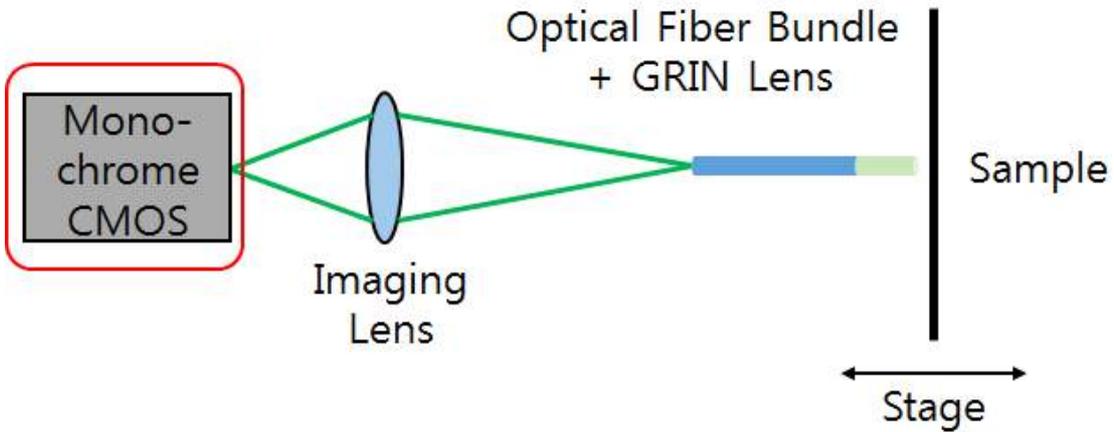


그림 3-45. CMOS 카메라를 이용한 영상 획득을 위한 개략도

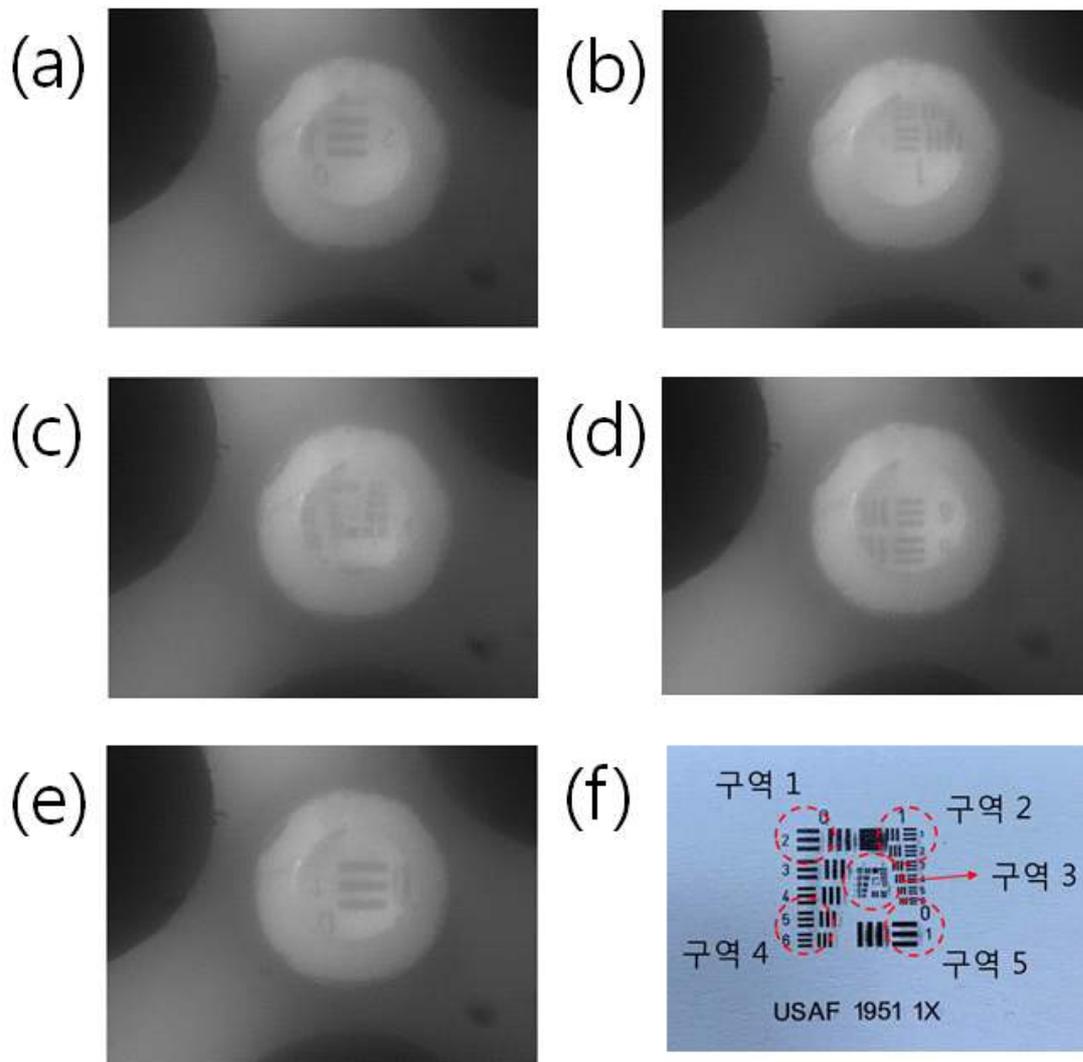


그림 3-46. CMOS 카메라를 이용하여 획득한 영상. (a) 구역 1의 영상, (b) 구역 2의 영상, (c) 구역 3의 영상, (d) 구역 4의 영상, (e) 구역 5의 영상, (f) 종이 샘플

그린 렌즈를 사용하여 일반 렌즈와 같이 표면 영상의 관찰이 가능하다는 것을 확인한 뒤 형광영상을 위해 실험을 진행하였다. 형광영상을 측정하기 위해 종이샘플에 숫자를 적고 그 선을 따라 형광비드를 찍어 형광샘플을 만들어 사용하였다. 이번 실험에서는 형광비드와 이색성 거울을 이용하여 형광영상을 획득하여 보았다. 이 때 실험 방식은 3-5장에 나와 있는 실험방식과 동일하며 초점렌즈를 그린 렌즈로 바꾸어 진행하였는데 이는 그림 3-47을 통해 확인할 수 있다. 이 때 격자가 그려진 종이샘플에 숫자를 직접 기입하고 이를 따라 형광비드를 이쑤시개로 모양을 따라 찍어내어 형광샘플을 만들어 사용하였으며 이는 그림 3-49를 통해 확인할 수 있다. 그림 3-48a), 3-48(b), 3-48(c)를 보면 숫자 1이 쓰인 샘플에 광원을 입사하지 않았을 때, 광을 약하게 입사하였을 때, 광을 강하게 입사하였을 때를 비교하여 보았는데, 광을 강하게 입사할수록 비드의 영상의 뚜렷하게 보임을 확인할 수 있었다. 또한 그림 3-48(d), 3-48(e), 3-48(f)는 위와 같은 방식으로 곡선이 들어간 숫자 2를 재 측정하여 보았는데 곡선과 숫자가 뚜렷하게 보임을 확인할 수 있었다. 이를 통해 제안한 광프로브의 형광 영상의 획득이 원활함을 실험적으로 확인할 수 있었다.

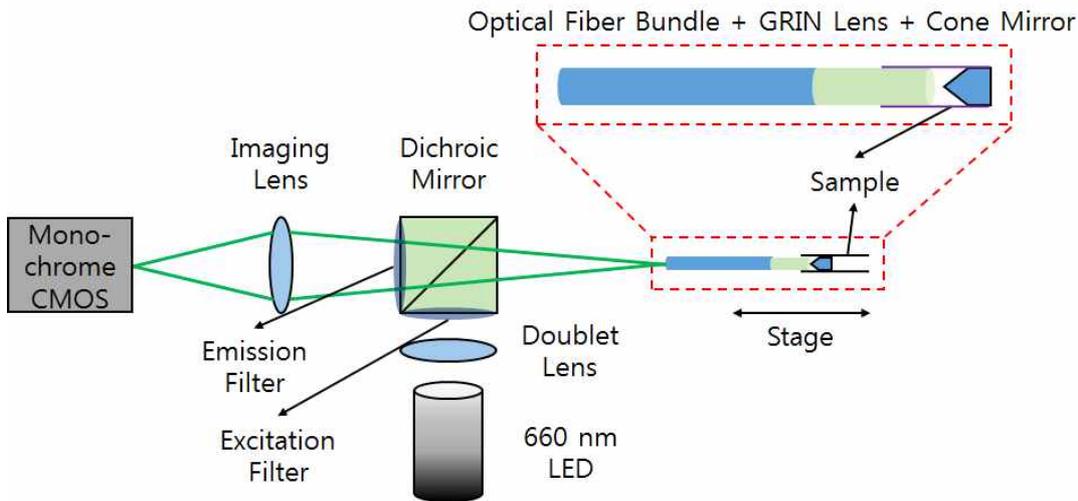


그림 3-47. 그린 렌즈를 이용하여 형광 영상 획득을 위한 개략도

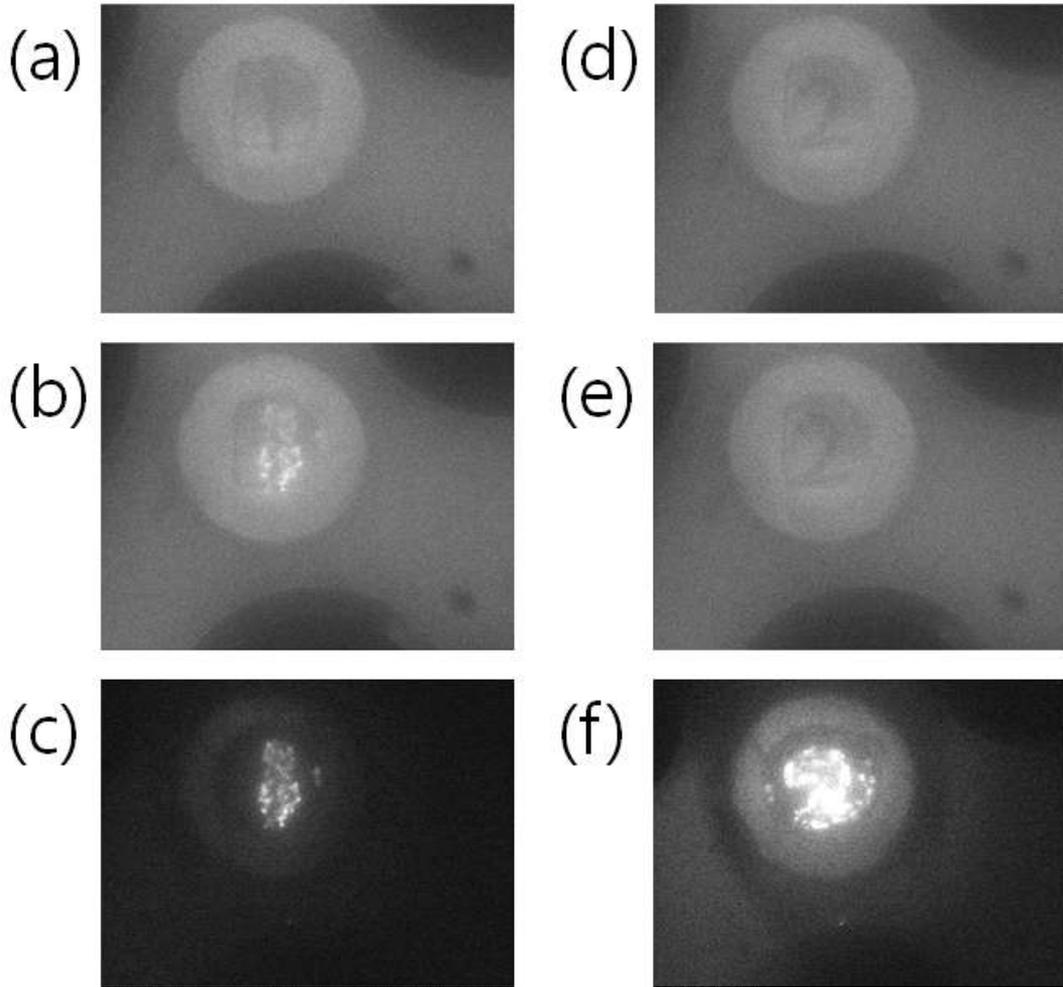


그림 3-48. 그린 렌즈를 이용하여 획득한 형광 영상. (a) 전등을 켜고 광원을 끈 경우의 숫자 1, (b) 전등을 켜고 광원을 켜 경우의 숫자 1, (c) 전등을 끄고 광원을 켜 경우의 숫자 1, (d) 전등을 켜고 광원을 끈 경우의 숫자 2, (e) 전등을 켜고 광원을 켜 경우의 숫자 2, (f) 전등을 끄고 광원을 켜 경우의 숫자 2

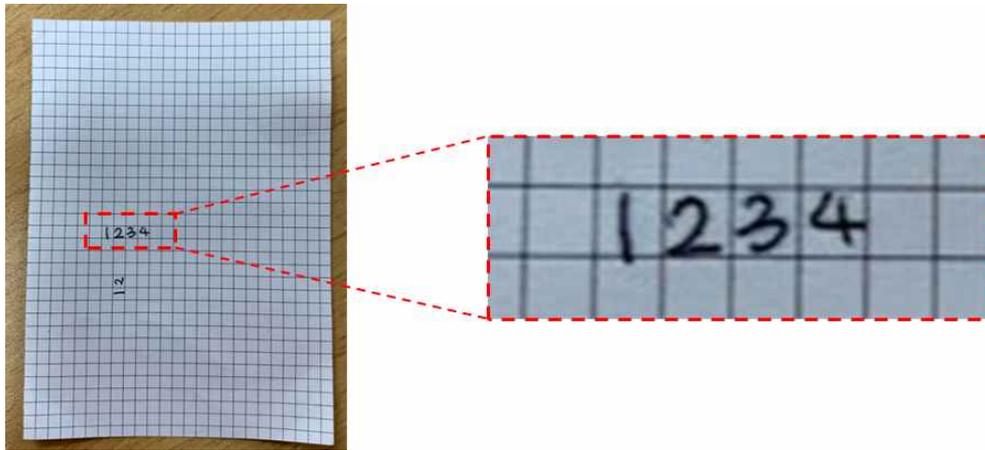


그림 3-49. 그린 렌즈를 이용하여 형광 영상 획득을 위한 샘플

이전과 동일한 방법으로 형광 파노라마 영상을 획득하기 위해 실험을 진행하였고, 파노라마 영상 획득을 위해 샘플이 고정된 스테이지를 이동시켜 영상획득을 진행하여 보았으며 이는 그림 3-50을 통해 확인할 수 있다. 그림 3-51(a)는 14개의 영상을 이어붙인 파노라마 영상이며, 그림 3-51(b)는 7개의 영상을 이어붙인 파노라마의 inverse를 반전으로 조정한 영상이다. 이 실험에서 사용한 샘플 문자 이미지는 그림 3-52를 통해 확인할 수 있다.

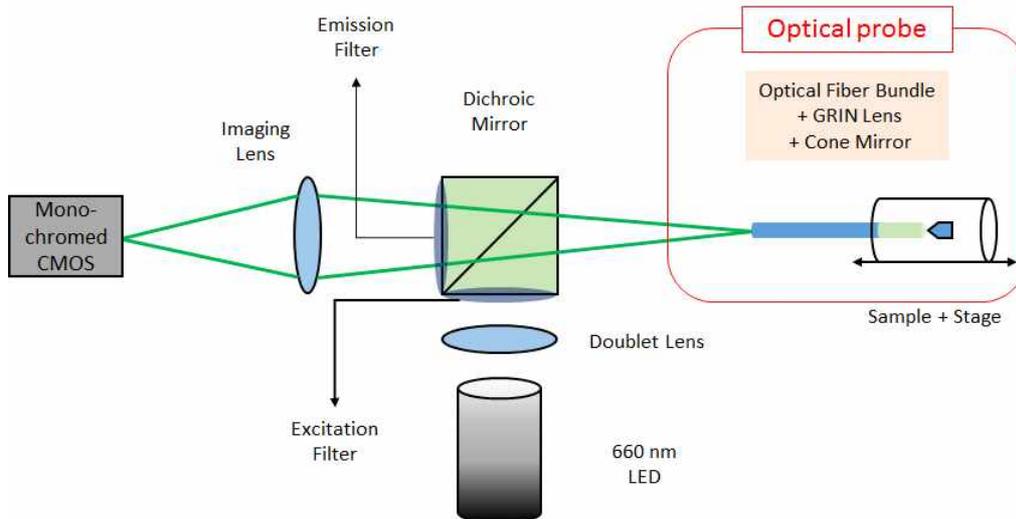


그림 3-50. 그린 렌즈를 이용하여 형광 파노라마 영상 획득을 위한 개략도

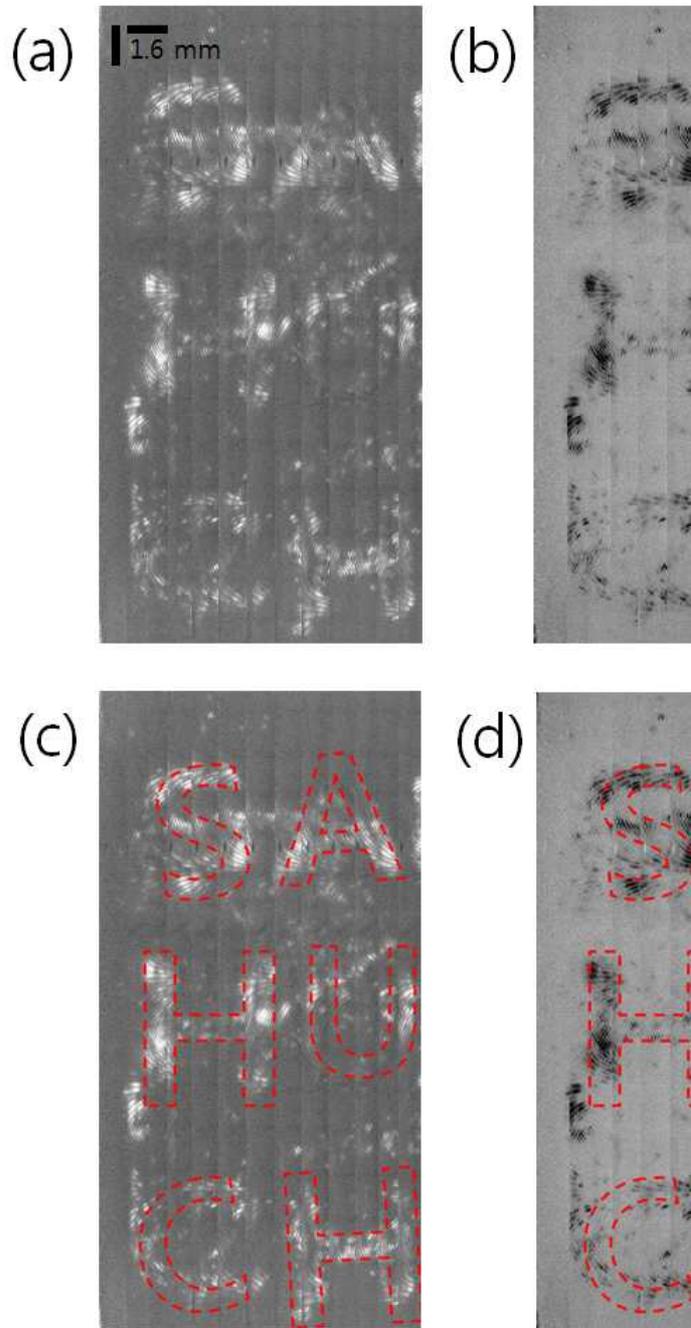


그림 3-51. 그린 렌즈를 이용하여 획득한 형광 파노라마 영상. (a) Inverse OFF, (b) Inverse ON, (c) (a)의 샘플의 모습을 본 뜬 영상, (d) (b)의 샘플의 모습을 본 뜬 영상

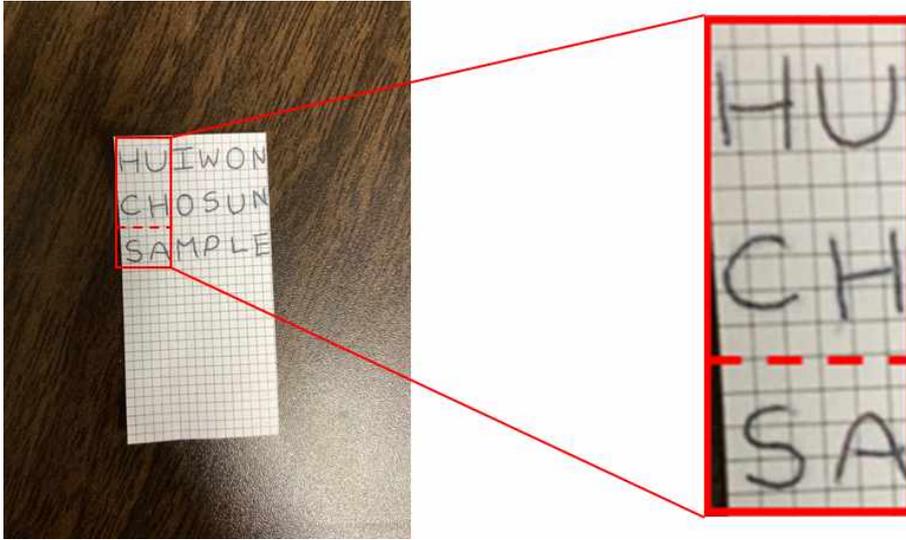


그림 3-52. 형광 파노라마 영상 획득을 위해 사용한 샘플 문자 이미지

제 4 장 결 론

기존의 측면영상을 획득하기 위해 필수적이었던 기계적인 회전력의 도움이 없이도 원통형 샘플의 내부 영상을 한 번에 측정할 수 있는 광섬유 내시경 프로브를 개발하여 실험적으로 표면영상과 형광영상을 획득한 결과를 제시하였다. 기존 광프로브가 가지는 제작의 어려움과 동작에서의 여러 고려사항들을 배제하고도 360도 전체 회전한 영상을 손쉽게 측정할 수 있는 대안을 제시하였다. 이를 위해서 광섬유 다발과 그린 렌즈, 그리고 원뿔형 거울을 이용한 방법을 제시하였고 그 결과 기계적인 회전을 전혀 이용하지 않고도 원통형 샘플의 내부 측면 파노라마 영상을 구현할 수 있었다. 평면이 아닌 360도 광의 반사를 수행할 수 있는 입체적인 원뿔형 거울을 이용하여 측면 내부로 광을 전파시키고 다시 광을 집광시키는 역할을 함으로써 기존 영상프로브가 구현하던 기능인 측면 영상 구현을 수행할 수 있었다. 또한 제한된 공간 안에서 광을 집속하기 위한 용도로 사용한 그린 렌즈가 상을 선명도를 향상시키는데 도움이 되었다. 그린 렌즈를 이용하여 광정렬을 설계함으로써 단순화된 광정렬로 설계를 단순화하고 필요한 광소자의 수를 효과적으로 줄일 수 있어 경제적인 내시경 형태의 프로브 개발이 가능할 수 있었다. 단순한 측면 표면 영상을 파노라마로 시각화하는 것 뿐만 아니라 기능성 영상인 형광 영상도 동일한 광프로브를 이용하여 획득할 수 있었다. 시스템의 광학 설계에서 형광을 야기하고 필터링 하기 위한 소자를 기존의 광영상 시스템과 같이 배치하여 광섬유 다발 앞에 이색성 거울과 여기, 방출 필터를 이용함으로써 원통형 샘플 내부에서 발현하는 형광신호의 획득이 가능함을 형광비드가 도포된 표면의 영상을 획득하여 비교함으로써 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 체내 혈관이나 장기 내부의 특별 조직에서 발현하는 형광특징을 살펴보기 위해서 활용이 가능할 것으로 예상되고 이를 통해 다양한 인체의 병변 확인에 응용이 가능할 것이라고 예상하는 바이다.

현재 실험에서 광섬유 다발과 원뿔형 거울을 고정하기 위하여 투명한 재질의 테이프를 사용하였는데 단단한 고정을 위해 여러 겹 겹쳐 붙여 영상의 선명도는 조금 떨어지지만 이는 기존 내시경에서 사용되는 투명한 재질의 유리관을 통해 해결 가능할 것으로 예상되어진다. 현재와 같은 수동 스테이지를 사용하여 샘플을 직접 같은 간격으로 이동시키는 방식이 아닌 샘플을 고정시킨 뒤 트리거를 이용하여 샘플이 아닌 내시경 프로브를 자동으로 이동시켜 영상을 획득하고 이와 동시에 획득된 영상을 랩뷰 프로그램을 통해 파노라마 형태로 재구현할 계획이다. 또한 더 작은 사이즈의 광섬유 다발과 원뿔형 거울을 사용하여 실제 내시경으로 사용하기 적합한 사이즈로 재실험할 계획이며, 이를 쥐의 혈관이나 장기에 직접 삽입하여 영상을 획득한 뒤 실제 내시경으로써 사용하기에 어떤 부분을 개선해야할지 추가 실험할 계획이다.

제안한 광프로브의 동작 원리는 의료용 내시경프로브 뿐만 아니라 일반 산업용으로도 적용 가능하여 다양한 응용 분야에서 파급효과가 클 것으로 예상되며, 내시경 프로브의 형태가 간단하고 사용된 광소자의 개수가 소량이어서 기존 내시경보다 경제적인 대안으로 활용이 가능할 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] G. J. Tearney, S. A. Boppart, B. E. Bouma, M. E. Brezinski, N. J. Weissman, J. F. Southern, and J. G. Fujimoto, "Scanning single-mode fiber optic catheter-endoscope for optical coherence tomography," *Opt. Lett.* 21(7), 543-545 (1996).
- [2] A. M. Rollins, R. Ung-Arunyawee, A. Chak, R. C. K. Wong, K. Kobayashi, M. V. Sivak, Jr., and J. A. Izatt, "Real-time in vivo imaging of human gastrointestinal ultrastructure by use of endoscopic optical coherence tomography with a novel efficient interferometer design," *Opt. Lett.* 24(19), 1358-1360 (1999).
- [3] M. V. Sivak, Jr., K. Kobayashi, J. A. Izatt, A. M. Rollins, R. Ung-Runyawee, A. Chak, R. C. Wong, G. A. Isenberg, and J. Willis, "High-resolution endoscopic imaging of the GI tract using optical coherence tomography," *Gastrointest. Endosc.* 51(4), 474-479 (2000).
- [4] P. H. Tran, D. S. Mukai, M. Brenner, and Z. Chen, "In vivo endoscopic optical coherence tomography by use of a rotational microelectromechanical system probe," *Opt. Lett.* 29(11), 1236-1238 (2004).
- [5] P. R. Herz, Y. Chen, A. D. Aguirre, K. Schneider, P. Hsiung, J. G. Fujimoto, K. Madden, J. Schmitt, J. Goodnow, and C. Petersen, "Micromotor endoscope catheter for in vivo, ultrahigh-resolution optical coherence tomography," *Opt. Lett.* 29(19), 2261-2263 (2004).
- [6] T.-H. Tsai, B. Potsaid, Y. K. Tao, V. Jayaraman, J. Jiang, P. J. S. Heim, M. F. Kraus, C. Zhou, J. Hornegger, H. Mashimo, A. E. Cable, and J. G. Fujimoto, "Ultrahigh speed endoscopic optical coherence tomography using

micromotor imaging catheter and VCSEL technology," *Biomed. Opt. Express* 4(7), 1119–1132 (2013).

- [7] T. Wang, T. Pfeiffer, E. Regar, W. Wieser, H. van Beusekom, C. T. Lancee, G. Springeling, I. Krabbendam, A. F. W. van der Steen, R. Huber, and G. van Soest, "Heartbeat OCT: in vivo intravascular megahertz-optical coherence tomography," *Biomed. Opt. Express* 6(12), 5021–5032 (2015).
- [8] A. Sergeev, V. Gelikonov, G. Gelikonov, F. Feldchtein, R. Kuranov, N. Gladkova, N. Shakhova, L. Snopova, A. Shakhov, I. Kuznetzova, A. Denisenko, V. Pochinko, Y. Chumakov, and O. Streltsova, "In vivo endoscopic OCT imaging of precancer and cancer states of human mucosa," *Opt. Express* 1(13), 432–440 (1997).
- [9] V. M. Gelikonov, G. V. Gelikonov, N. D. Gladkova, N. M. Shahova, F. I. Feldchtein, and A. M. Sergeev, "Optical coherent tomography apparatus, fiberoptic lateral scanner and method for studying biological tissues in vivo," U.S. Patent: 6,608,684, August 19, (2003).
- [10] M. J. Cobb, X. Liu, and X. Li, "Continuous focus tracking for real-time optical coherence tomography," *Opt. Lett.* 30(13), 1680–1682 (2005).
- [11] E. J. Seibel and Q. Y. J. Smithwick, "Unique features of optical scanning, single fiber endoscopy," *Lasers Surg. Med.* 30(3), 177–183 (2002).
- [12] L. Huo, J. Xi, Y. Wu, and X. Li, "Forward-viewing resonant fiber-optic scanning endoscope of appropriate scanning speed for 3D OCT imaging," *Opt. Express* 18(14), 14375–14384 (2010).
- [13] W. Liang, K. Murari, Y. Zhang, Y. Chen, M. J. Li, and X. Li, "Increased illumination uniformity and reduced photodamage offered by the Lissajous

scanning in fiber-optic two-photon endomicroscopy," *J. Biomed. Opt.* 17(2), 021108 (2012).

- [14] N. Zhang, T.-H. Tsai, O. O. Ahsen, K. Liang, H.-C. Lee, P. Xue, X. Li, and J. G. Fujimoto, "Compact piezoelectric transducer fiber scanning probe for optical coherence tomography," *Opt. Lett.* 39(2), 186-188 (2014).
- [15] Y. Pan, H. Xie, and G. K. Fedder, "Endoscopic optical coherence tomography based on a microelectromechanical mirror," *Opt. Lett.* 26(24), 1966-1968 (2001).
- [16] W. Jung, D. T. McCormick, J. Zhang, L. Wang, N. C. Tien, and Z. Chen, "Three-dimensional endoscopic optical coherence tomography by use of a two-axis microelectromechanical scanning mirror," *Appl. Phys. Lett.* 88(16), 163901 (2006).
- [17] M. Strathman, Y. Liu, X. Li, and L. Y. Lin, "Dynamic focus-tracking MEMS scanning micromirror with low actuation voltages for endoscopic imaging," *Opt. Express* 21(20), 23934-23941 (2013).
- [18] J. Sun, S. Guo, L. Wu, L. Liu, S.-W. Choe, B. S. Sorg, and H. Xie, "3D in vivo optical coherence tomography based on a low-voltage, large-scan-range 2D MEMS mirror," *Opt. Express* 18(12), 12065-12075 (2010).
- [19] X. Zhang, C. Duan, L. Liu, X. Li, and H. Xie, "A non-resonant fiber scanner based on an electrothermally-actuated MEMS stage," *Sens. Actuators A Phys.* 233, 239-245 (2015).
- [20] Y.-H. Seo, K. Hwang, H.-C. Park, and K.-H. Jeong, "Electrothermal MEMS fiber scanner for optical endomicroscopy," *Opt. Express* 24(4), 3903-3909 (2016).

- [21] J. Wu, M. Conry, C. Gu, F. Wang, Z. Yaqoob, and C. Yang, "Paired-angle-rotation scanning optical coherence tomography forward-imaging probe," *Opt. Lett.* 31(9), 1265-1267 (2006).
- [22] T. Xie, D. Mukai, S. Guo, M. Brenner, and Z. Chen, "Fiber-optic-bundle-based optical coherence tomography," *Opt. Lett.* 30(14), 1803-1805 (2005).
- [23] H. D. Ford and R. P. Tatam, "Characterization of optical fiber imaging bundles for swept-source optical coherence tomography," *Appl. Opt.* 50(5), 627-640 (2011).
- [24] J.-H. Han and J. U. Kang, "Effect of multimodal coupling in imaging micro-endoscopic fiber bundle on optical coherence tomography," *Appl. Phys. B* 106(3), 635-643 (2012).
- [25] M. D. Risi, H. Makhlof, A. R. Rouse, and A. F. Gmitro, "Analysis of multimode fiber bundles for endoscopic spectral-domain optical coherence tomography," *Appl. Opt.* 54(1), 101-113 (2015).
- [26] A. R. Tumlinson, L. P. Hariri, U. Utzinger, and J. K. Barton, "Miniature endoscope for simultaneous optical coherence tomography and laser-induced fluorescence measurement," *Appl. Opt.* 43(1), 113-121 (2004).
- [27] S. Y. Ryu, H. Y. Choi, J. Na, E. S. Choi, and B. H. Lee, "Combined system of optical coherence tomography and fluorescence spectroscopy based on double-cladding fiber," *Opt. Lett.* 33(20), 2347-2349 (2008).
- [28] H. Yoo, J. W. Kim, M. Shishkov, E. Namati, T. Morse, R. Shubochkin, J. R. McCarthy, V. Ntziachristos, B. E. Bouma, F. A. Jaffer, and G. J. Tearney,

"Intra-arterial catheter for simultaneous microstructural and molecular imaging in vivo," *Nat. Med.* 17(12), 1680-1684 (2011).

- [29] J. Mavadia, J. Xi, Y. Chen, and X. Li, "An all-fiber-optic endoscopy platform for simultaneous OCT and fluorescence imaging," *Biomed. Opt. Express* 3(11), 2851-2859 (2012).
- [30] S. Liang, A. Saidi, J. Jing, G. Liu, J. Li, J. Zhang, C. Sun, J. Narula, and Z. Chen, "Intravascular atherosclerotic imaging with combined fluorescence and optical coherence tomography probe based on a double-clad fiber combiner," *J. Biomed. Opt.* 17(7), 0705011 (2012).
- [31] Gora, Michalina J., et al. "Endoscopic optical coherence tomography: technologies and clinical applications." *Biomedical optics express* 8.5 2405-2444 (2017).
- [32] Daisuke Miyamoto, Masanori Murayama, "The fiber-optic imaging and manipulation of neural activity during animal behavior"
- [33] <http://www.easypano.com/panoramic-photography.html>
- [34] Guo, Kai, and Zhuang Li. "Image Reconstruction from Omnidirectional Camera." BOSTON UNIVERSITY, Technical report No. ECE-2007-06, (2007).
- [35] https://en.wikipedia.org/wiki/1951_USAF_resolution_test_chart
- [36] https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1209

Publication

Conference Papers

1. 김주하, 강희원, 최은서, “Cross-talk suppression based on multimode illumination”, 봄학술논문발표회(한국물리학회), P2-op.019, 2019.
2. 강희원, 김주하, 최은서, “기계적 움직임이 없는 프로브를 이용한 측면 파노라마 영상 구현”, 한국물리학회 광주전남지부발표회 (한국물리학회), P16, 2018.
3. 김주하, 강희원, 최은서, “저배율 대물렌즈를 사용한 광포획 특성 분석”, Optics and Photonics Congress(한국광학회), WP-VI-10, 2018.
4. Ju Ha Kim, Seung Seok Lee, Hui Won Kang, Eun Seo Choi, “Feasibility study of distributed sensing based on optically tunable fiber Bragg gratings”, The 7th Asia Pacific Optical Sensors Conference, Wed_P29, p. 36, 2018.
5. 김주하, 강희원, 이승석, 최은서, “아크 방전 조건에 따른 측면 발산 광소자의 특성 변화”, 봄학술논문발표회(한국물리학회), P2-Op.007, p. 201, 2018.
6. 김주하, 강희원, 권다움, 최은서, “광압 기반 광분류기의 구현에 필요한 조건에 대한 연구”, 봄학술논문발표회(한국물리학회), P2-op.016, 2018.

7. 김주하, 강희원, 송우섭, 최은서, “가변 광섬유 격자 기반 분산 센서의 시간-주파수 분석”, 제 25회 광전자 및 광통신 학술회의(COOC), WP-C-3, 2018.
8. 김주하, 이승석, 강희원, 최은서, “단일 광섬유 격자를 이용한 온도와 압력 동시 측정 기법”, Photonics Conference(한국광학회), TP-IV-5, pp. 298-299, 2017.
9. 김주하, 강희원, 이승석, 최은서, “파장 가변 FBG를 이용한 파장 의존성 간섭계 구현”, 한광전(한국물리학회), P25, 2017.
10. 이승석, 권다움, 김주하, 강희원, 최은서, “Flow channel dynamics monitoring with interferometry”, Annual Biophotonics Conference , WP-VI-2, p. 37, 2017.