

고속 3차원 측정 및 칼라 이미징을 위한 다중 광탐침 공초점 주사 현미경

천완희[†] · 이승우 · 안진우 · 권대갑^{*}

[†]한국과학기술원 기계항공시스템학부 나노옵토메카트로닉스 연구실, ^{*}한국과학기술원 기계항공시스템학부 교수

Confocal Scanning Microscopy with Multiple Optical Probes for High Speed 3D Measurements and Color Imaging

Wan Hee Chun[†], Seung Woo Lee, Jin Woo Ahn and Dae Gab Gweon^{*}

[†]Nano Opto-Mechatronics Lab., School of Mechanical, Aerospace & Systems Engineering, KAIST

^{*}Professor of School of Mechanical, Aerospace & Systems Engineering, KAIST

ABSTRACT

Confocal scanning microscopy is a widely used technique for three dimensional measurements because it is characterized by high resolution, high SNR and depth discrimination. Generally an image is generated by moving one optical probe that satisfies the confocal condition on the specimen. Measurement speed is limited by movement speed of the optical probe; scanning speed. To improve measurement speed we increase the number of optical probes. Specimen region to scan is divided by optical probes. Multi-point information each optical probe points to can be obtained simultaneously. Therefore image acquisition speed is increased in proportion to the number of optical probes. And multiple optical probes from red, green and blue laser sources can be used for color imaging and image quality, i.e., contrast, is improved by adding color information by this way. To conclude, this technique contributes to the improvement of measurement speed and image quality.

Key Words : Confocal scanning microscopy, three dimensional measurement, high speed measurement, color imaging

1. 서 론

반도체나 디스플레이 기기들의 대량생산 생산수율을 높이기 위해서는 생산 공정 중에 발생하는 결함의 원인을 찾아 제품의 불량률을 낮춰야 한다. 이상적으로는 각 제조 공정마다 검사 장비들을 설치하여 발생하는 결함들을 분석하고 결과를 제조 공정에 반영해야 한다. 하지만 이와 같은 공정으로부터 수율 상승이 이어지려면 검사 장비의 빠른 측정 속도가 필수적으로 요구된다.

최근 화제가 되고 있는 반도체 후공정의 범프나 디스플레이 소자 역시 대량생산을 하기 위해서는 정밀 검사가 필요하다. 특히 높이 혹은 깊이 방향으로의 정보가 필요하므로 3차원 형상 검사를 통해서만 결함을 판별할 수 있다. 하지만 3차원 검사 장비의 경우 측정

속도가 상대적으로 느려 고속 3차원 측정 기술에 대한 많은 연구가 필요한 상황이다. 이러한 요구 속에서 3차원 측정용으로 널리 사용되고 있는 공초점 현미경 기술을 응용하여 고속 3차원 측정을 구현하고자 한다.

공초점 현미경 속도를 향상시키기 위한 선행연구로서 선형광이나 다파장광원의 분산을 이용한 방법이 있었다. 하지만 선형광의 경우 완벽한 공초점이 아니기 때문에 분해능 저하가 우려되고 다파장광원을 이용하는 경우 분산 광학 소자의 광효율 문제가 발생한다. 또한 선형광원, 다파장광원의 광량이 충분치 못 할 경우 영상의 음영대비가 저하될 수 있어 성능 좋은 광원이 필요하다. 본 논문에서는 분해능, 광효율, 광원 입장에서 문제점이 적은 개별 특정 파장 레이저 광원을 이용한 다중 광탐침 공초점 현미경을 제안하고자 한다.

이 기술은 더불어 동일 시스템에서 칼라 이미징 기술을 구현할 수 있다. LCD 칼라 필터와 같이 색을 가진 시편의 경우 검사기의 광원 파장에 따라 반사된 빛의

[†]E-mail : nanityun@kaist.ac.kr

양이 달라져 영상의 질, 음영대비에 영향을 줄 수 있는데 이에 대한 영향을 해결하고자 대표 파장 광원들을 사용해 색 정보도 함께 이미징한다.

2. 작동 원리

2.1. 공초점 현미경

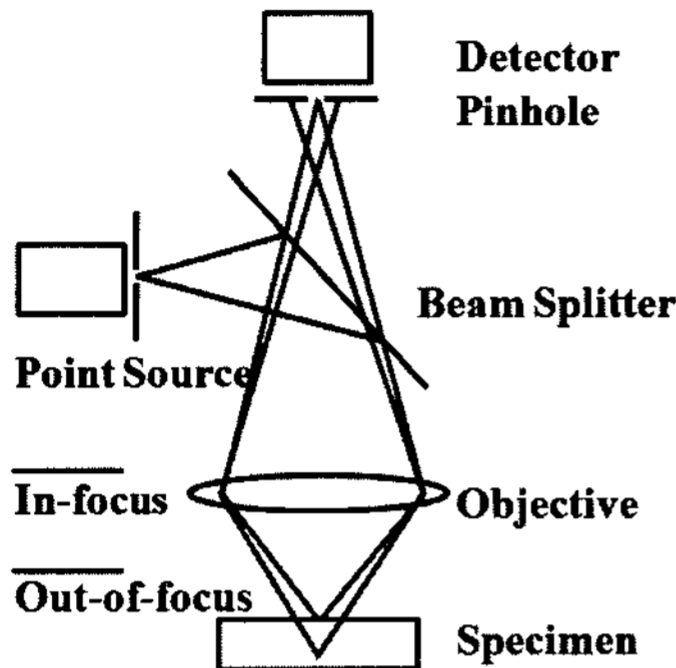


Fig. 2.1. Confocal scanning microscope.

공초점 현미경은 Fig 2.1과 같이 특징적으로 요약할 수 있다. 시편상의 한 점에 초점을 맺고 되돌아온 빛을 편향을 이용해 걸러내 검출함으로써 한 점 정보를 얻어내고 시편 상의 여러 점 정보들을 모음으로써 이미지로 복원할 수 있다[1].

이러한 공초점 원리로 인해 광학 현미경에서 제한되는 공간 분해능보다 향상된 공간 분해능을 기대할 수 있고 잡광을 비롯한 노이즈를 제거할 수 있어 높은 신호대 잡음비를 보여준다. 또한 검출된 신호들은 깊이 분별력을 가지기 때문에 여러 장의 2차원 광학 영상들을 모아 3차원 이미지로 복원할 수 있다.

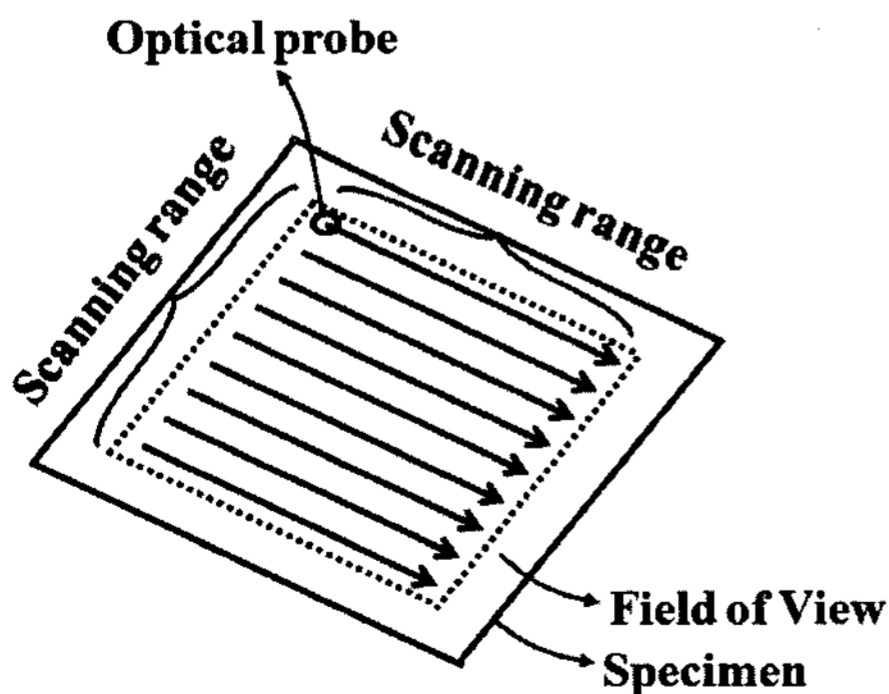


Fig. 2.2. Scanning mechanism

단 한 번에 시편 상 초점 위치의 정보만을 얻을 수 있기 때문에 여러 점 정보들을 얻기 위해서는 Fig. 2.2

와 같이 초점 위치를 이동시키는 작업이 필요하다. 이는 마치 공초점 조건에 의해서 생성된 광탐침이 시편 영역 위를 움직이는 스캐닝 작업으로 볼 수 있다.

2.2. 다중 광탐침 기술

다중 광탐침 기술이라 함은 공초점 조건을 만족하는 광탐침의 개수를 증가시켜 이를 이용하는 기술을 이야기하며 측정 속도 향상과 칼라 이미징 기술을 구현하는데 응용하고자 한다.

2.2.1. 측정 속도 향상

공초점 현미경 기술은 광탐침의 스캐닝 작업이 필요하다고 하였다. 따라서 전체 측정 속도는 스캐닝 속도에 의해서 결정되고 스캐닝 속도는 가장 빠른 스캐닝 도구의 속도에 의해 제한된다. 따라서 측정속도를 향상시키기 위해서는 스캐닝 도구의 속도를 향상시키거나 제한된 스캐닝 도구의 속도 한계를 극복하는 스캐닝 방법이 필요하다.

본 논문에서 제안하는 다중 광탐침 공초점 현미경 기술은 공초점 조건을 만족하는 여러 광탐침을 시편 상에 생성하고 스캐닝 도구가 작동할 때 여러 광탐침이 동시에 움직이게 함으로써 스캐닝 속도가 향상된다.

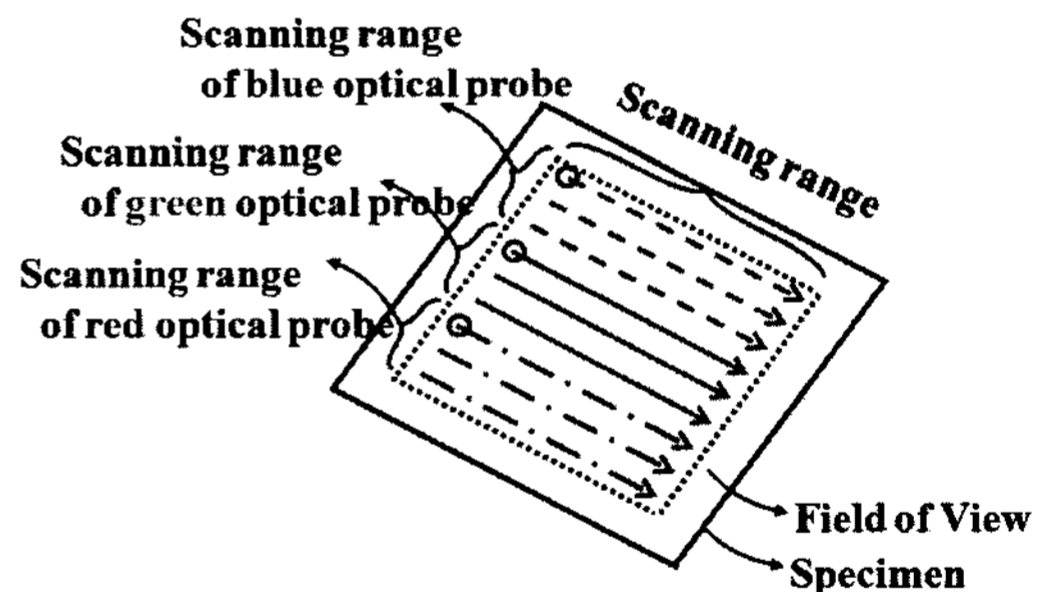


Fig. 2.3. Multiple optical probes.

다시 말해서 Fig 2.3과 같이 다중 광탐침은 측정 영역을 분할하고 할당된 영역 내에서 움직이면서 여러 점 정보를 동시에 받아들이는 역할을 한다. 결과적으로 특정 시편 영역을 측정하기 위해 필요한 스캐닝 구간 및 시간이 줄어들고 스캐닝 속도가 향상되는 셈이다. 따라서 광탐침의 개수를 증가시키면 개수에 비례하는 측정 속도를 기대할 수 있다.

2.2.2. 칼라 이미징 기술

색이 있는 시편의 경우 공초점 현미경에서 사용하는 광원의 파장에 따라 다른 이미지를 얻게 된다. 빛의 파장에 따라 시편의 반사 특성이 달라지기 때문에 반사

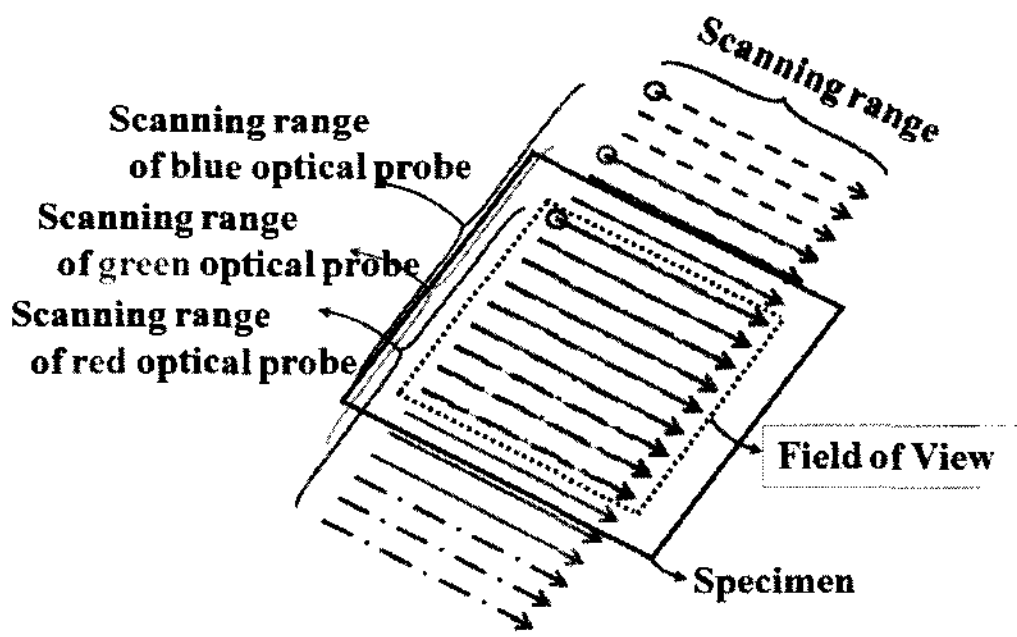


Fig 2.4. Beam scanning for color imaging.

율이 좋지 않은 경우 이미지의 음영대비가 저하된다. 이러한 경우 다중 광탐침 기술을 이용하여 Fig 2.4와 같이 대표 파장 빨강, 초록, 파랑 광탐침으로 동일한 시편 영역을 스캐닝하면 시편의 색 정보가 포함된 반사 이미지를 복원해내는 칼라 이미징 기술을 구현할 수 있다. 단 다중 광탐침은 앞서 이야기했던 측정 속도 향상 모드와 다르게 동작한다. 시편의 정해진 위치에 광탐침들이 있는 시스템 구성에서 시편 전체 영역을 스캐닝할 수 있도록 Fig 2.4와 같이 스캐닝한다. 이는 Fig 2.5처럼 각 광탐침이 스캐닝한 것으로 간주할 수 있으며 특정 시편 영역의 필요한 정보만을 얻어내는데 활용한다.

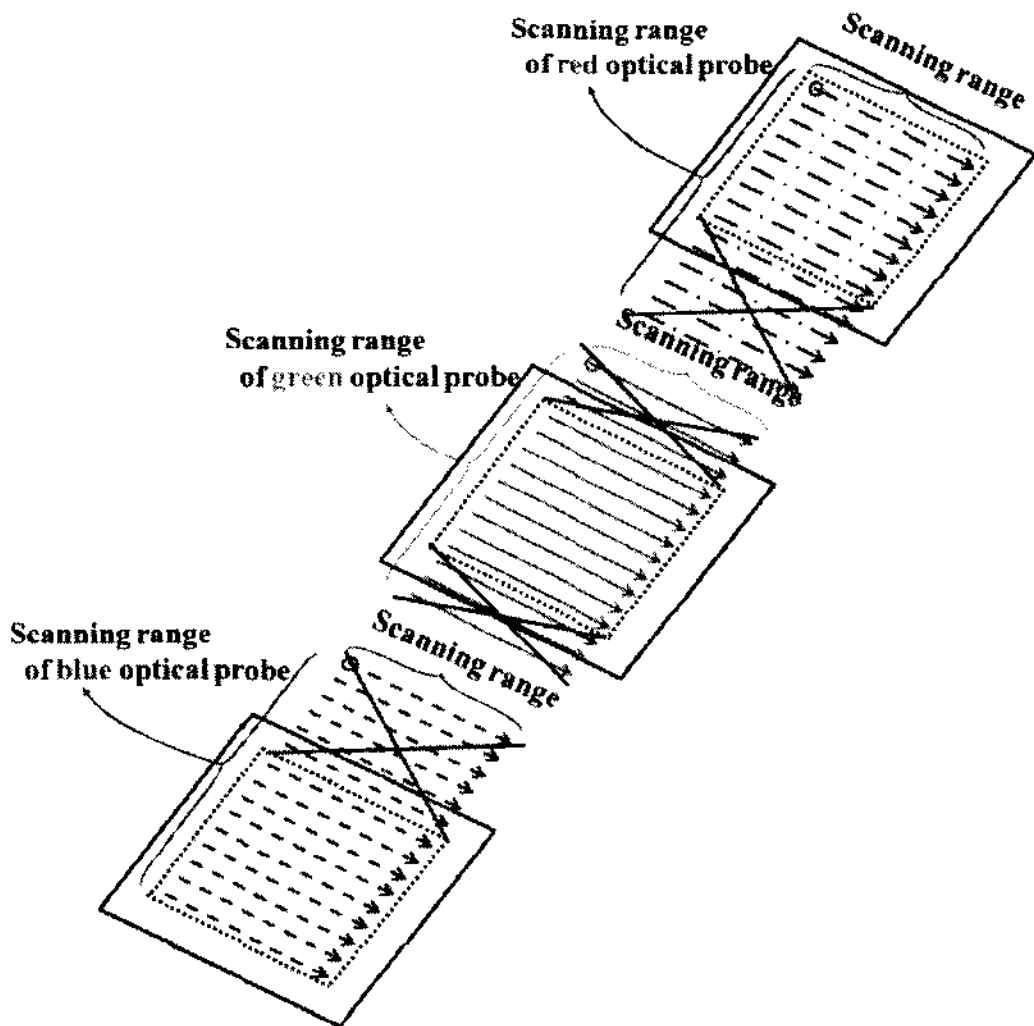


Fig. 2.5. Scanning of each optical probe.

3. 시스템 구성

Fig 3.1과 같이 세 개의 광탐침을 만들기 위하여 세 개의 레이저 광원을 사용한다. 빨강(633 nm), 초록

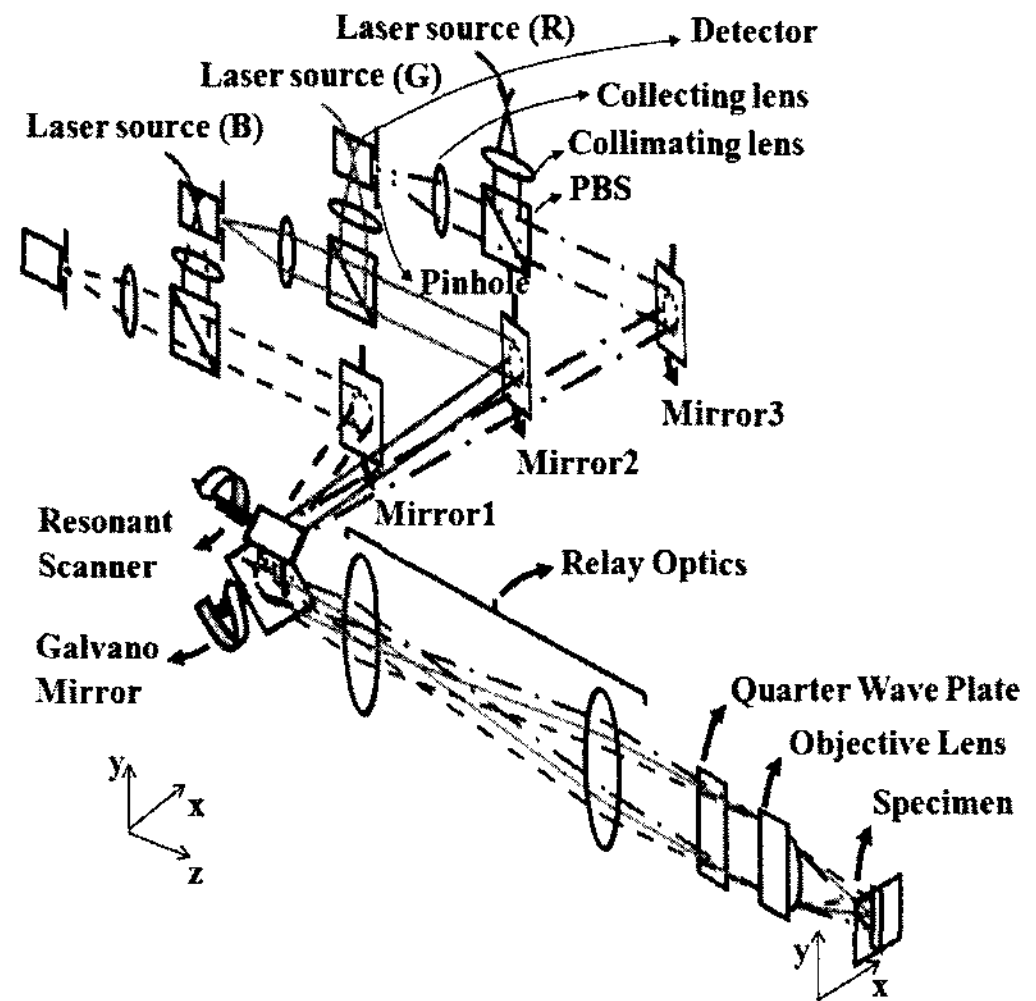


Fig. 3.1. Schematic diagram of optical system.

(543 nm), 파랑(488 nm) 파장의 레이저 광원으로부터 세 개의 평행광을 만들고 거울을 이용해 광선 경로의 각도가 만들어준 뒤 스캐닝 도구로 입사시킨다. 빔 스캐닝의 원리는 광선의 각도를 변화시켜줌으로써 시편 상의 초점 위치를 변화시킨다는 것이다. 따라서 서로 각도가 다른 세 개의 광선이 입사되면 Fig. 3.1과 같이 시편 상 서로 다른 위치에 세 개의 초점이 형성된다. 이러한 원리로 세 개의 광탐침이 형성되며 세 영역을 정확히 나눠주기 위해서는 광선 각도를 만들어 주고 있는 거울을 정밀하게 정렬할 필요가 있다. 스캐닝 도구로 회전축이 직각인 회전거울을 사용하여 광선의 경로를 바꿔준다. 공진형 스캐너와 갈바노 거울을 이용하여 광선의 각도를 매우 빠르게 바꿔줄 수 있다. 속도 향상에 기여하는 세 개의 광탐침은 갈바노 거울의 회전 구간을 줄여주고 갈바노 거울의 움직임은 속도 한계를 극복할 수 있도록 돕는다. 그리고 칼라 이미징 모드의 경우 갈바노 거울의 회전 각도를 조절하여 전체 영역을 스캐닝할 수 있다. 대물렌즈의 초점 위치에 시편이 있을 경우 빛은 반사되고 진행되어 왔던 방향으로 되돌아가며 핀홀을 통과한 빛만 검출된다. 검출된 빛은 시편의 세 위치의 시편 정보이고 스캐닝 도구가 동작하면 여러 지점 정보와 그 때의 위치 정보를 포함시킴으로써 2차원 이미지로 복원시킬 수 있다. 그리고 대물렌즈를 광축 방향으로 움직여가면서 여러 장의 2차원 광학 영상을 여러 장 얻어낼 수 있고 영상처리를 통해 3차원 이미지를 복원된다.

이와 같은 구성의 광학 시스템은 Fig 3.2와 같이 모

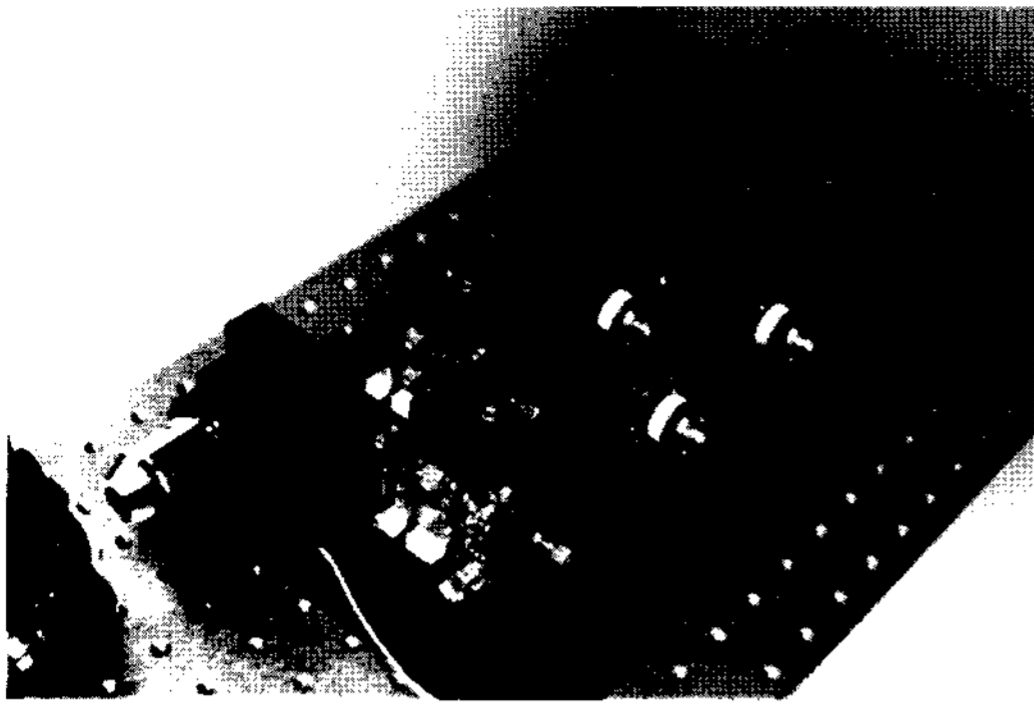


Fig. 3.2. System configuration

들로 설계하여 제작하고 실험하였다. 측정기의 전체 크기는 400 mm×200 mm×150 mm이고 적합한 검사 도구가 되기 위해서 크기를 줄이기 위해 효율적인 공간 활용을 하였다.

4. 성능 분석

4.1. 공간 분해능

본 시스템의 공간 분해능을 분석 및 성능을 예측하기 위하여 공초점 원리를 기초로 시뮬레이션을 해보았다 [2]. 3차원 측정기로서 공간 분해능은 횡방향 분해능, 축방향 분해능으로 나눌 수 있다. 실제 um 단위를 변환하였고 파장, 핀홀 크기 선택에 따른 분해능 변화를 Fig 4.1과 같이 요약하였다. 횡방향 분해능 대표값으로는 광강도 점퍼짐 함수의 반치폭을 축방향 분해능 대표값으로는 평면 거울의 광축 분포의 반치폭을 사용하

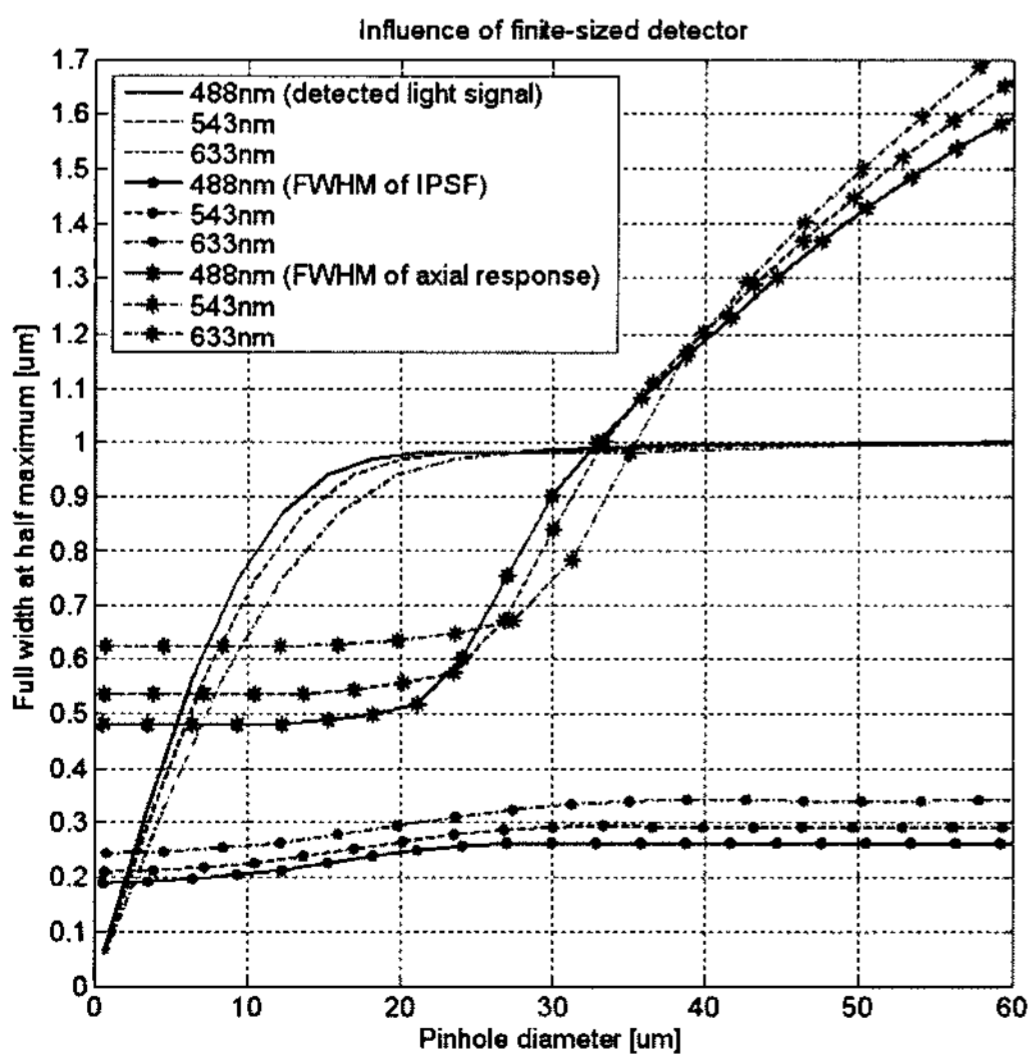


Fig. 4.1. Changes of resolution, detected signal.

였다. 또 핀홀 크기에 따라 광량이 부족할 수 있으므로 핀홀 크기에 따른 광량의 크기도 함께 비교해보았다.

구체적인 시뮬레이션 조건은 대물렌즈 NA 0.9, 핀홀 앞 집광렌즈 NA 0.02이고 488 nm, 543 nm, 633 nm 세 개의 파장을 대상으로 하였으며 단위는 실제 단위 um로 사용하였다.

위 결과를 바탕으로 30 um핀홀을 각각 세 개 사용하였을 경우 각 파장 광탐침에 대하여 횡방향 분해능은 0.25~0.35 um 축방향 분해능은 0.75~0.9 um로 예상할 수 있겠다.

4.2. 측정 속도

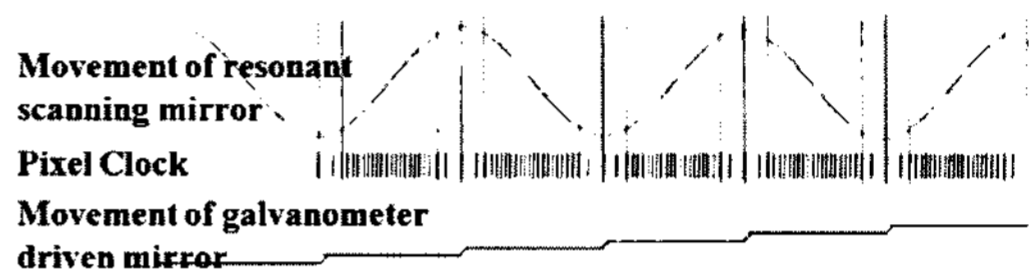


Fig. 4.2. Movement of scanning parts

측정 속도는 스캐닝 도구의 속도와 광탐침 개수에 의해 결정된다. Fig. 4.2는 스캐닝 도구의 움직임과 관련된 그림이다. 공진형 스캐너는 삼각함수 형태로 움직이고 선형적인 데이터 획득을 위하여 공진형 스캐너의 픽셀 클락을 이용한다. 삼각함수 반 주기의 스캐닝에 의해 횡방향 스캐닝을 한 번 하고 회방향 스캐닝을 마친 후 갈바노 거울이 종방향으로 움직이면서 2차원 스캐닝을 한다[3].

전체 측정 속도는 공진형 스캐너의 속도에 의해 결정된다. 공진형 스캐너는 8kHz로 공진하는 빠른 회전 거울이다. 한 주기 동안 근접 선형 구간은 두 번 존재하므로 두 번 횡방향 스캐닝할 수 있고 16kHz의 속도의 횡방향 스캐닝이 가능하다. 513×512 픽셀 이미지를 얻기 위해서 각각의 광탐침에 의하여 171×512 픽셀 이미지가 필요하고 171 번의 횡방향 스캐닝이 필요하다. 결국 2차원 이미지를 얻는 작업을 1초에 90번 시행할 수 있으며 513×512 픽셀 이미지를 90frames/s의 속도로 얻을 수 있다고 이야기할 수 있겠다.

5. 실험 결과

5.1. 측정 속도 향상 모드

제작한 공초점 현미경 모듈을 사용하여 이미지를 획득하였다. 색깔이 있는 시편을 활용하여 얻어낸 이미지들이다.

Fig. 5.1 왼쪽 그림은 2차원 이미지이고 오른쪽 그림은 광축 방향으로 스캐닝하면서 얻어낸 2차원 이미지들

로부터 복원해낸 3차원 이미지이다.

2차원 이미지를 얻는데 필요한 시간이 줄어들면서 측정 속도가 향상되었다. 동일한 조건에서 2차원 이미지들을 여러 장 얻어내 3차원 이미지를 얻어냈으므로 3차원 형상 측정 속도 역시 향상되었고 측정 속도 분석에서 예상한 90frames/s 이 가능하였다.

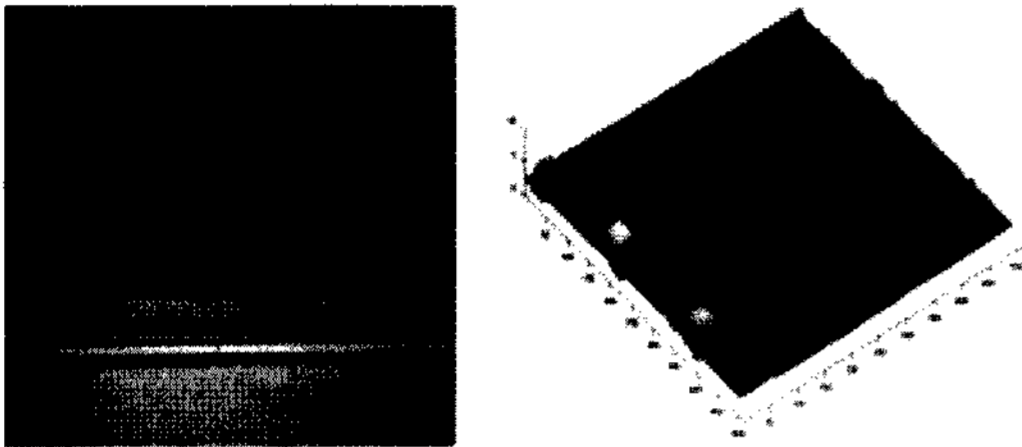


Fig. 5.1. Reconstructed 2D image and 3D image.

단 2차원 이미지의 경우 각 광탐침 별로 얻어낸 이미지 간에 영역 분리가 되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 세 개의 광탐침들의 특징이 서로 다르기 때문이다. 예를 들어 세 개의 레이저의 출력이 서로 다르고 검출할 시에 검출기 감도가 다를 수 있으며 파장에 따라 반사율이 차이가 있기 때문이다. 이 문제가 크다면 이미지 처리를 통해 영향을 줄일 수 있겠지만 3차원 이미지를 복원할 때 필요한 최대 위치 정보에는 영향을 주지 않으므로 3차원 이미지를 복원할 시에는 그림에서 확인할 수 있듯이 영향이 없다.

5.2. 칼라 이미징 모드

본 시스템에서 또 다른 기능으로서 제안한 칼라 이미징 기술을 적용하여 색깔이 있는 시편을 관찰해 보

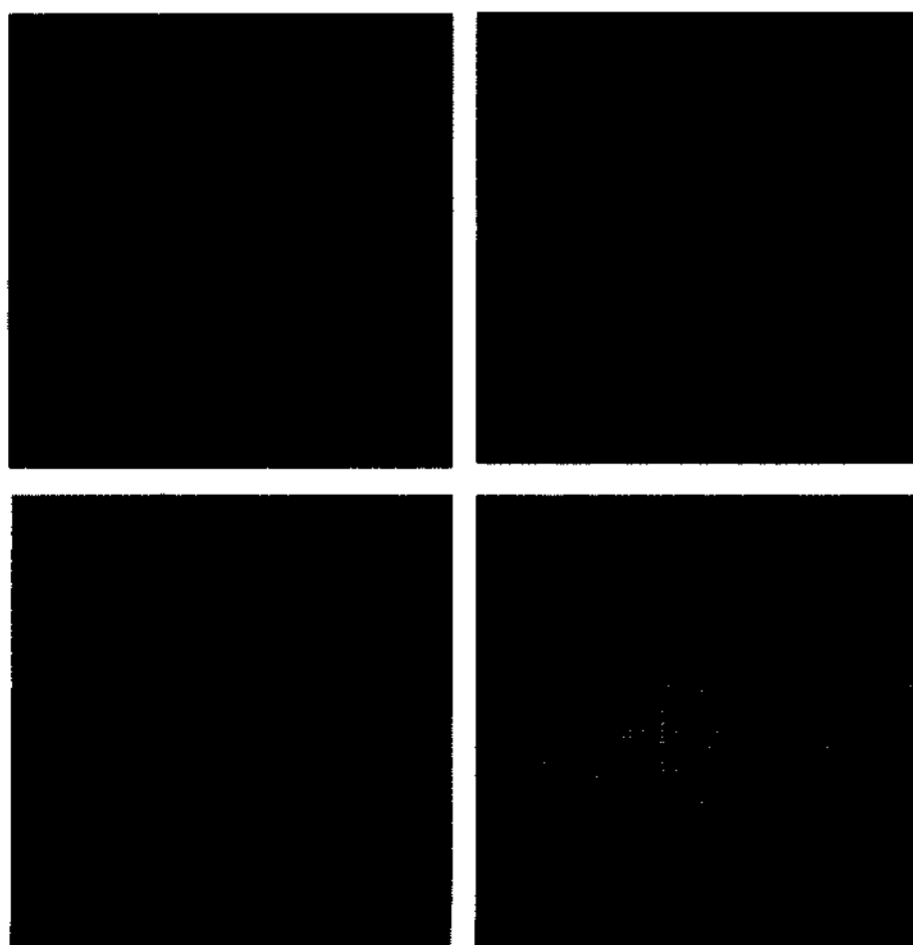


Fig. 5.2. Image for color imaging (a) Blue (b) Green (c) Red optical probe (d) Reconstructed color image.

았다. 칼라 이미징을 위한 모드로 동작하기 위해서는 측정 속도 향상 모드와 다르게 각 광탐침이 동일 특정 시편 영역을 스캐닝을 하도록 갈바노 거울을 회전시켰다. 이렇게 스캐닝하여 얻어진 각각의 이미지는 Fig 5.2(a), (b), (c) 와 같다. (a), (b), (c) 이미지는 파랑, 초록, 빨강 광탐침을 이용하여 얻은 이미지이고 세 개의 이미지를 합쳤을 때는 (d) 이미지와 같았다.

비교를 위해서 백색광 일반 광학 현미경을 이용하여 같은 시편의 참고 이미지를 얻었고 Fig 5.3와 같다. 먼저 일반 광학 현미경으로 관찰한 이미지를 분석해보면 파랑의 반사율이 적은 부분은 노랑으로, 초록의 반사율이 적은 부분은 자홍으로, 빨강의 반사율이 적은 부분은 청록으로 관찰된 것을 확인하였다. 즉 색깔이 있는 이 시편은 영역 별로 특정 색이 나타나는 시편이었고 이러한 효과는 공초점 현미경으로부터의 이미지인 Fig 5.2에서도 확인할 수 있다. 광탐침의 종류에 따라 어둡게 보이는 부분이 관찰되었고 사용하는 광탐침에 따라 그 위치가 달라지고 있으며 참고 이미지와 같은 분포를 보임을 확인할 수 있었다. 즉 파장에 따른 반사율이 낮아져 어둡게 관찰되고 특정 파장만 사용하면 음영대비가 나빠진다는 사실을 (a), (b), (c)의 이미지를 통해서 확인할 수 있다.

하지만 이들 세 이미지를 합친다면 (d) 와 같은 칼라 이미지를 얻어낼 수 있고 이 이미지는 Fig 5.3과 유사한 칼라 이미지가 된다. 여러 색깔이 혼합된 시편의 경우 역시 이러한 합친 이미지를 사용하는 것이 적합할 수 있다.

결론적으로 이 다중 광탐침 기술을 이용하면 이미지의 질, 음영대비가 가장 좋은 파장이 선택적으로 사용할 수 있으며 빨강, 초록, 파랑 광탐침으로부터 얻어진 세 이미지를 합침으로써 원래의 칼라 이미지를 복원하는데 응용할 수 있어 전체 영상의 음영대비를 향상시

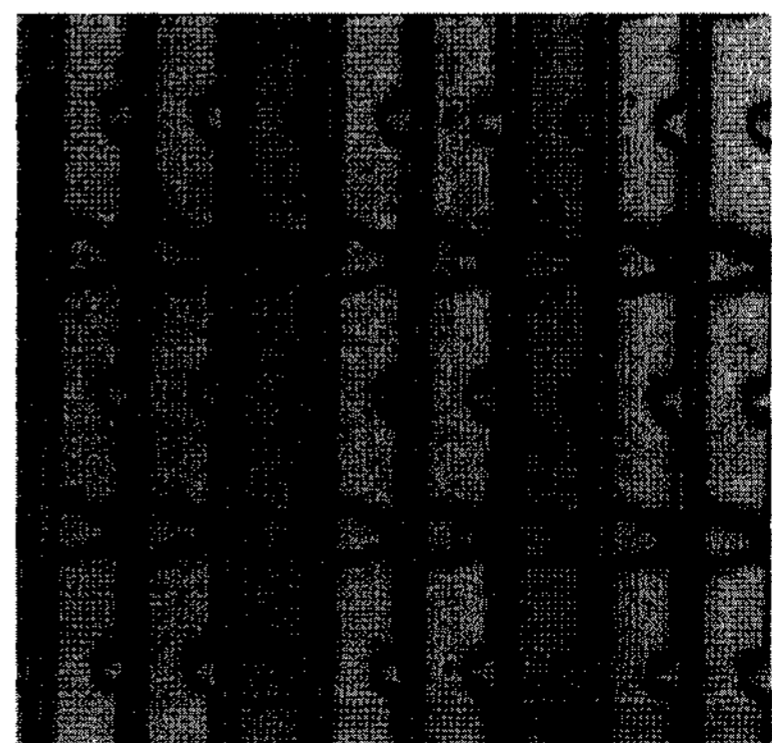


Fig. 5.3. Reference image from wide field color CCD.

켜 결함에 민감한 영상을 얻고 검출해낼 수 있다[4].

6. 결 론

측정 속도 향상과 칼라 이미징이라는 기술을 구현하기 위한 다중 광탐침 공초점 현미경을 제안하였다. 모듈을 설계, 제작하였고 실험을 통해 제안하였던 기능을 구현할 수 있었다.

서브 마이크로미터의 크기를 가진 시편을 513×512 픽셀 이미지 기준으로 90frames/s 이라는 굉장히 빠른 속도로 관찰할 수 있었다. 그리고 색을 가진 시편의 경우 칼라 이미징 기술을 응용하여 이미지 질을 높일 수 있다는 가능성을 확인하였다.

참고문헌

1. C.J.R. Sheppard, D.M. Shotton "Confocal laser scanning microscopy", BIOS Scientific Publishers Limited, 6-10 (1997).
2. Mingu, "Principles of Three-dimensional imaging in confocal microscopes", World Scientific, 97-122 (1996).
3. N. Callamaras, I. Parker, "Construction of a confocal microscope for real-time x-y and x-z imaging", Cell calcium (1999).
4. Stephen W. Paddock, Eric J. Hazen, and Peter J. DeVries, Methods and Applications of Three-Color Imaging for Laser Scanning Confocal Microscopy, BioTechniques: Vol. 22, 120 (1997).